

Aus dem Institut für Animalische Physiologie der Universität
Frankfurt am Main
(Direktor: Prof. Dr. K. Wezler)

Untersuchungen über
die Folgebewegung der menschlichen Hand
bei verschiedenen Erregungsmustern

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
der hohen Medizinischen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main
vorgelegt von
Jan Christoph Hummel
Darmstadt

Frankfurt am Main 1963

1964



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Animalische Physiologie der Universität
Frankfurt am Main
(Direktor: Prof. Dr. K. Wezler)

Untersuchungen über
die Folgebewegung der menschlichen Hand
bei verschiedenen Erregungsmustern

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
der hohen Medizinischen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main
vorgelegt von
Jan Christoph Hummel
Darmstadt

Frankfurt am Main 1963



Dekan: Prof. Dr. med. J. Frey

Referent: Prof. Dr. med. K. Wezler

Korreferent: Prof. Dr. med. Kulenkampff

Tag der mündlichen Prüfung: 24.3.64

E I N L E I T U N G

Die Untersuchung der willkürlichen und unwillkürlichen Bewegungsabläufe beim Menschen nach den Gesichtspunkten der Regelungstheorie hat sich wegen der außerordentlich komplexen Vorgänge im Zentralnervensystem bisher auf zwei, dem Experiment gut zugängliche Systeme beschränkt: das der Augen- und das der Handbewegung. Nach den Untersuchungen von VOSSIUS (15,17), lässt sich für die Augenbewegung folgendes Regelsystem aufstellen (Abb. 1):

In der Netzhaut wird die Abweichung des zu fixierenden Punktes von der Fovea centralis, die der Fehlerabweichung der Sehachse des Auges entspricht, gemessen. Dieser Meßwert wird in den höheren optischen Zentren ausgewertet und als Stellbefehl an die niederen Zentren der Augenmuskelkerne weitergegeben.

Hier fließen auch Erregungen von anderen sensorischen Bezirken wie dem Vestibularisgebiet zu, die dem Stellbefehl der höheren Zentren überlagert, und mit ihm an die äußere Augenmuskulatur übermittelt werden. Der Erfolg der von den Augenmuskeln durchgeführten Blickwendung wird wieder von der Retina kontrolliert; so ist der Regelkreis geschlossen.

Um eine sinnvolle Drehung des Augapfels zu erreichen, muß das Vorzeichen der umlaufenden Regelgröße umgekehrt werden, damit der aufgetretenen Abweichung entgegengewirkt wird. Ohne diese Vorzeichenumkehr würde der Fehler fortlaufend weiter vergrößert, das System würde in Endstellung laufen und dort verharren.

Die Ausführung des Stellbefehls an die Augenmuskeln wird in diesen selbst durch die Muskelspindeln überwacht und auf dem kürzesten Wege den Augenmuskelkernen zurückgemeldet.

So ergeben sich zwei Regelkreise, ein "äußerer" mit dem Auge als Meßwerk und den höheren optischen Zentren als Regler und ein untergeordneter "innerer"

mit den Muskelspindeln als Meßwerk und den Augemuskelkernen als Regler. Die Regelstrecke, der Bulbus des Auges und die äußeren Augenmuskeln, die gleichzeitig das Stellglied darstellen, ist beiden gemeinsam.

Die Totzeiten der beiden Regelkreise unterscheiden sich wesentlich voneinander: 100 - 150 ms für den äußeren und 5 - 10 ms für den inneren. Nur durch die kurze Totzeit des Unterregelkreises ist die Durchführung von sprungförmigen Augenbewegungen, wie sie beim Wechsel des Sehobjektes auftreten, in der kurzen Zeit von 70 - 120 ms möglich (VOSSIUS) (17). Diese Bewegungen werden alleine vom Unterregelkreis geführt, da über den äußeren Kreis nur in Abständen von 100 - 120 ms Meßwerte ausgegeben werden können. Da nach den Untersuchungen von VOSSIUS (14) bei den vorliegenden Verhältnissen die Einstellzeit etwa das 6 - 10-fache der Totzeit beträgt, würde der Hauptregelkreis zur Einstellung auf das Ziel ein Vielfaches der wirklich benötigten Zeit brauchen.

Die Bewegungsabläufe bei kontinuierlichen Folgebewegungen lassen den Schluß zu, daß die Verarbeitung in den höheren optischen Zentren in zwei parallel zueinander liegenden Filtern vorgenommen wird. Das eine spricht nur auf kontinuierliche Bewegung an und hat eine niedrige obere Grenzfrequenz von etwa 3 Hz, weist jedoch Vorhalteeigenschaften auf. (SÜNDERHAUF) (10). Das andere mißt die Winkelabweichung des Sehobjektes von der Fovea centralis, überlagert diesen Meßwert in diskontinuierlichen Abständen von mindestens 100 ms dem Ausgang des ersten Filters und korrigiert so dessen Einstellung.

Auch für die Regelung der gezielten Willkürbewegung der Hand ergaben die Untersuchungen von MAYNE (6), KÜPFMÜLLER (4), KÜPFMÜLLER und POKLEKOWSKI (5), VOSSIUS (12), VOSSIUS und CHOUDHRY (13) und ALTROCK (1) die Existenz zweier Regelkreise die in

Form eines Kaskadenregelsystems miteinander verbunden sind. Von Kaskadenregelung spricht man, wenn die Stellgröße eines Regelkreises für einen zweiten "Unterregelkreis" Führungsgröße ist und die Regelstrecke und Regelgröße beiden gemeinsam ist (OPPELT) (7), (SCHÄFER) (8). Der Aufbau dieses Regelsystems ist dem der Augenbewegung prinzipiell ähnlich.

Regelstrecke sind der Arm und die Hand, Regelgröße ist die von der Hand auszuführende Bewegung. Die Abweichung der Handstellung vom vorgegebenen Ziel oder Erregungsmuster wird von der Retina gemessen und an die Zentren des Großhirns weitergegeben, die den Regler darstellen und sich ebenfalls aus einem kontinuierlichen Filter und aus einem Tastfilter zusammensetzen. Von dort wird der Stellbefehl den motorischen Vorderhornzellen des Rückenmarks zugeleitet, deren Efferenz eine entsprechende Verstellung der Muskulatur bewirkt, und deren Erfolg erneut von der Retina festgestellt wird. Den Vorderhornzellen fließen auch noch Erregungen aus dem extrapyramidalen System, sowie sensorische Reize aus der Peripherie zu. Diese Afferenz ist die Rückmeldung vom Meßwerk des Unterregelkreises, den Muskelspindeln der Hand- und Armmuskulatur und sehr wahrscheinlich in gewissem Umfange den Rezeptoren der Gelenke und denen der Hautsensibilität. Der Regler sitzt im Bereich der entsprechenden Rückenmarkszentren, Stellglied sind die Armmuskeln. VOSSIUS (16) konnte zeigen, daß der Unterregelkreis der Handbewegung in seinem Wirkungsmechanismus als Proportional - Integralregelkreis dem der Augenbewegung entspricht.

Der Frequenzgang der menschlichen Handbewegung, das heißt ihr Folgeverhalten bei Vorgabe einfacher Sinusschwingungen, wurde in einer ausführlichen Arbeit von ALTROCK (1) untersucht. Danach liegt die obere Grenzfrequenz für die Handfolgebewegung bei 10 Hz

und unterscheidet sich so wesentlich von der des Auges mit etwa 3 Hz. Bis 2 Hz zeigt die Folgebewegung einen deutlichen Phasenvorhalt gegenüber der Vorgabe, der sich zu Beginn eines jeden Versuchs erst allmählich aus einem Phasennachhalt herausbildet, ein Beweis für die Vorhersageeigenschaft des kontinuierlichen Filters. Bis 3 Hz erfolgt die Antwort der Versuchsperson noch frequenzgetreu, Vorgabe und Folgebewegung entsprechen sich, wobei die Amplituden zunehmend kleiner werden. Im Gegensatz zur Augenbewegung deren Amplitude bei Frequenzen über 3 Hz mehr und mehr zu Null wird, erfolgt bei der Handbewegung ein erneutes Anwachsen der Amplitude bis etwa 4 Hz, um dann erst wieder kleiner zu werden. Die vorgegebene Frequenz wird im Bereich über 3 Hz nicht mehr eingehalten, sondern bis zu einer Erregungsfrequenz von 5 Hz erfolgt die Antwort mit höherer, über 5 Hz mit geringerer Folgefrequenz.

Eigene Folgefrequenzen stellen sich auch in dem Bereich unter 3 Hz ein, wenn die Versuchsperson im Verlaufe eines Versuchs die Augen schließt und ohne Sicht der Vorgabe- und der Folgemarke, die Bewegung aus dem Gedächtnis weiterführen mußte.

Bietet man Mischkurven aus mehreren Sinusschwingungen an, die in einem nicht ganzzahligen Verhältnis zu einander stehen und damit ein sich nicht wiederholendes Muster, so geht die Vorhersageeigenschaft des kontinuierlichen Filters verloren. Die Antwortkurven zeigen dann einen mit steigender Frequenz zunehmenden Phasennachhalt. (ELLSON) (2), (Tustin) (11), (STARK und Mitarbeiter) (9).

Die bisherigen Untersuchungen sind vorwiegend unter dem Gesichtspunkt der reinen linearen Systemtheorie und in teilweise schematisierender Anlehnung an technische Regelkreise, wie zum Beispiel Autopiloten im Flugwesen, durchgeführt worden. Verbliebene Unklarheiten wurden Nichtlinearitäten im System zugeschrie-

ben, aber nicht weitergehend untersucht.

Die Ergebnisse von ALTROCK, sowie die von ELLSON, TUSTIN und STARK, sind jedoch bei Voraussetzung eines einfachen linearen Systems nicht einzuordnen, sondern fordern einen wesentlich komplizierteren Mechanismus der Reizverarbeitung und -beantwortung.

In dieser Arbeit sollte versucht werden, die Gesetzmäßigkeiten der Übertragungseigenschaften des Systems der menschlichen Handbewegung genauer zu klären und so einen weiteren Einblick in die zentralnervöse Verarbeitung von Erregungsmustern zu gewinnen.

M E T H O D I K

Zur Durchführung der Versuche war es notwendig, Sinusschwingungen verschiedener Frequenzen zu einer Summenkurve mischen zu können. Diese zusammengesetzten Erregungsmuster wurden mit einem elektromechanischen Generator für Frequenzen bis 10 Hz von folgendem Aufbau erzeugt:

Die Schleifer von 5 Präzisionspotentiometern wurden über einen Exzenterantrieb fast rein sinusförmig hin und her bewegt. (Abb. 2) Am Schleifer konnte die sinusförmige Spannungsänderung eines vorgegebenen Gleichstroms abgegriffen und über ein Widerstandsnetzwerk einem gemeinsamen Ausgang zugeführt werden. Der Fehler dieses Additionsnetzwerkes war kleiner als 1 %.

Durch verschiedene Zahnradübersetzungen konnten die Potentiometer entweder so gekoppelt werden, daß sie sich im Verhältnis 1 : 2 : 3 : 4 : 5 zueinander bewegten, sich das Muster also nach Ablauf der Grundfrequenz wiederholte, oder aber im Verhältnis von etwa 1 : 2,21 : 3,44 : 4,77 : 6,20, womit ein quasi nicht-periodisches Muster erreicht wurde, das sich bei einer Grundfrequenz von 1 Hz erst nach 4 Stunden wiederholte. Als "Grundfrequenz" wird immer die niedrigste, im Gesamtmuster enthaltene Frequenz bezeichnet.

Die Frequenz der Grundschiwingung konnte von 0,1 Hz bis 2,0 Hz verändert werden. Die Versuche wurden vorwiegend bei Frequenzen von 0,25; 0,5; 0,75 und 1,0 Hz für die Grundschiwingung durchgeführt.

Bei der Verwendung von periodischen Mustern konnte durch Phasenverschiebung der Oberwellen gegenüber der Grundwelle die Gestalt der Vorgabekurve beliebig geändert werden.

Die Amplituden der einzelnen Schwingungskomponenten waren kontinuierlich im Verhältnis 1 : 8 zu variieren oder konnten zu Null gemacht werden. Damit war die entsprechende Frequenz nicht mehr in dem Gesamtmuster enthalten.

Das so erzeugte Vorgabemuster wurde durch ein Spie-

gelgalvanometer auf eine Mattscheibe als zwei Millimeter breiter, hin und her wandernder Lichtspalt abgebildet; die Bewegungsamplitude betrug 10^0 . Der hierzu benutzte Aufbau entsprach dem von VOSSIUS und CHOUDHRY (13) sowie ALTROCK (1) angegebenen. Der Zeiger mit dem die Versuchsperson (Vp.) der Vorgabemarke zu folgen hatte, war jedoch durch einen roten Lichtpunkt von 1 mm Durchmesser ersetzt, der parallel zum Vorgabesignal ebenfalls auf die Mattscheibe abgebildet wurde. Der Folgehebel war gleichzeitig verkürzt und leichter gestaltet worden. Die Vp. hatte die Aufgabe, die auf der Mattscheibe abgebildeten Lichtmarken so gut wie möglich zur Deckung zu bringen. Die Antwort der Vp. wurde durch ein am Folgehebel befestigtes Präzisionspotentiometer in Spannungsänderungen transformiert und gleichzeitig mit der Vorgabebewegung direkt auf einem Elektrokardiographen der Fa. Siemens (Cardirex) registriert. Die Sitzposition der Vpn. war so gewählt, daß der Arm im Ellenbogengelenk um 90^0 gewinkelt war, die Bewegung also vorwiegend im Schultergelenk, mit dem Oberarm als Drehachse, durchgeführt wurde. Die Versuche wurden in einem verdunkelten Raum vorgenommen. Bei einer Versuchsserie wurde während des Versuchs mindestens einmal die Vorgabe- und Folgemarke ausgeschaltet. Die Vp. mußte dann die seitherige Bewegung mit geschlossenen Augen aus dem Gedächtnis weiterführen. ("Dunkelversuche") Bei Kommando "Licht" waren Vorgabe- und Folgemarke wieder sichtbar, und die Vp. hatte mit geöffneten Augen erneut zu folgen. Durch Abschalten der Folgemarke und Verdecken des Armes war es möglich, die Kontrolle der ausgeführten Bewegung auszuschließen, und damit den äußeren Regelkreis aufzutrennen. ("Versuche mit offenem System"). Vor Beginn und am Ende eines jeden Versuchs wurde eine Amplitudeneichung vorgenommen. Die Genauigkeit der Registrierung betrug, bezogen auf den jeweiligen

Endwert, $\pm 1\%$.

Die Untersuchungen wurden vorwiegend an drei männlichen und einer weibliche Versuchsperson durchgeführt, eine Serie an neun Versuchspersonen.

Zur rechnerischen Verwertung der Versuchsergebnisse war es erforderlich, die Amplitudenwerte der Kurve an diskreten Punkten abzulesen, die für das erfaßte Stück konstanten Zeitabständen entsprechen, und damit gleichen Abstand voneinander haben mußten.

Hierzu verwandten wir ein mechanisches Ablesegerät, das gestattete diese Intervalle auf 0, 01 mm genau einzustellen. Die Abtastschritte wählten wir so, daß auf die höchste in der Kurve enthaltene Frequenz zehn Tastpunkte pro Schwingung ausgewertet wurden.

Diese Werte wurden zur Ermittlung des Frequenzinhaltes, der Amplituden der einzelnen Frequenzen sowie des Phasenverhaltens der einzelnen Schwingungen zueinander auf einem elektronischen Rechner vom Typ IBM 650 einer Fourieranalyse oder bei komplizierteren Vorgabemustern einer Berechnung des Leistungsspektrums und der Phasenwinkel unterzogen. *)

*) · Herrn Priv. Doz. Dr. Gerhard VOSSIUS sowie Herrn cand. ing. Jürgen SCHRÖTER darf ich an dieser Stelle für die mathematische Ableitung der Rechenverfahren, sowie die Aufstellung der Programme für die IBM 650 und die Durchführung der Rechnungen sehr herzlich danken.

DIE VERSUCHE UND IHRE ERGEBNISSE

In der ersten Versuchsreihe verwandten wir zwei verschiedene Erregungsmuster, die beide aus einer Grundschwingung mit den beiden ersten Oberwellen, also im Frequenzverhältnis 1 : 2 : 3 zusammengesetzt waren. Die Amplitude der drei Schwingungen war in beiden Mustern gleich, nur die Phasenverschiebung der beiden Oberwellen gegenüber der Grundwelle war verschieden gewählt. In einem Falle betrug sie 90° und 180° , wodurch ein symmetrisches Muster entstand, dem von den Vpn. gut zu folgen war und von uns deshalb als "einfach" bezeichnet wurde. Im anderen Falle waren die Oberwellen um 270° und 270° verschoben, hierbei entstand ein Muster, das von den Vpn. als schwerer zu folgen empfunden wurde; wir nannten es "kompliziert" (Abb.3). Mit diesen beiden Vorgabebewegungen, die sich lediglich in der Phasenverschiebung ihrer Oberwellen gegenüber der Grundwelle unterschieden, sollte geklärt werden, ob die optischen Zentren nach Art eines linearen Filters wirken. Bei Vorliegen eines solchen Filters mußten, unabhängig von der Form des Musters, die Phasenwinkel zwischen Vorgabe- und Folgebewegung und die Amplituden sich entsprechender Frequenzen die gleichen Werte aufweisen.

Die Versuche wurden an neun Vpn. durchgeführt, die über die Zusammensetzung der Muster und die Fragestellung nicht informiert wurden und auch vor Beendigung der ganzen Serie die registrierten Kurvenbilder nicht sehen durften. Die Frequenz der Grundschwingung betrug 0,5 Hz und 1,0 Hz, sodaß jede Vp. vier Versuche durchzuführen hatte. Dabei wurde die Reihenfolge so vertauscht, daß jede Vp. mit einer anderen Variationsmöglichkeit zwischen einfach und kompliziert sowie 0,5 Hz und 1,0 Hz begann. Während der Versuche wurden Vor-

gabe- und Folgemarke für eine zeitlang ausgeschaltet, sodaß die Vp. mit geschlossenen Augen aus dem Gedächtnis die Bewegung fortzusetzen hatte ("Dunkelversuche"). An zwei Vpn. wurden auch Versuche mit offenem System durchgeführt, d.h. die Sicht auf die Folgebewegung war verdeckt.

Schon bei einfacher Betrachtung der Versuchsergebnisse sieht man, daß dem einfachen Vorgabemuster durchweg besser gefolgt wird als dem komplizierten. (Abb.3) Dies tritt besonders deutlich bei den Versuchen mit einer Grundfrequenz von 1,0 Hz hervor. Zu Beginn der Versuche wird das einfache Muster schneller erkannt und richtig nachgebildet. (Abb.4) Während der Dunkelversuche können die Vpn. das einfache Muster genauer und u.U. auch länger weiterführen als das komplizierte. Erstaunlich ist die Beobachtung, daß sich die Antwort mehrfach mit Beginn der Dunkelphase verbesserte (Abb.5). Der Vergleich zwischen offenem und geschlossenem System zeigt sowohl bei einfachem als auch bei kompliziertem Muster eine eindeutige Vergrößerung des ganzen Kurvenbildes, die auch während der Dunkelphase erhalten bleibt (Abb.6).

Zur objektiven Berechnung dieser Befunde werteten wir aus jedem Versuch ein zusammenhängendes Stück von fünf Perioden aus dem Bereich aus, in dem die Vp. Sicht auf Vorgabe und Folge hatte. (Versuche mit "geschlossenem System"). Von den Dunkelversuchen wählten wir Abschnitte von drei zusammenhängenden Perioden aus, bei den Versuchen mit offenem System aus beiden Bereichen (Sicht - Dunkelversuch) je fünf Perioden. Bei der Auswahl gingen wir so vor, daß wir aus dem ganzen Versuch das Stück auswählten, welches die beste Folgeleistung zeigte. Diese Auswahlmethode ist ohne Zweifel problematisch und muß zwangsläufig Fehler mit sich bringen. Ein so kurzer Abschnitt kann nicht Repräsentation des ganzen Versuchs, der im Durchschnitt

über 90 Schwingungen durchgeführt wurde, sein. Die Ergebnisse werden zugunsten der schlechteren Reihe, in diesem Falle des komplizierten Musters, ausfallen. Hier waren gute Kurvenstücke oft schwer zu finden, während sie bei dem einfachen Muster immer ausreichend vorhanden waren. Die Zeit, welche die Vp. am Anfang eines Versuchs zum Einstellen auf das Muster benötigt, tritt durch die Auswahl ebenfalls nicht direkt in Erscheinung. Auch die Möglichkeit zur statistischen Analyse war durch die Beschränkung auf so wenige Fälle eingeeengt. *)

Die ausgewählten Versuchsabschnitte wurden, jeweils in einzelne Perioden zerlegt, einer Fourieranalyse unterzogen, deren Ergebnisse wir statistisch auswerten. Trotz der geringen Anzahl der Fälle reichten die Befunde aus, um den Unterschied zwischen einfachem und kompliziertem Muster deutlich zu machen.

Tabelle 1 gibt die aus der Fourieranalyse der Vorgabekurven erhaltenen Normwerte für das einfache und komplizierte Muster, sowie die Abweichung des Mittelwerts der Folgebewegung von diesem Sollwert und die zugehörigen Standardabweichungen an. Die Formeln wurden der Sammlung von GRAF und HENNING (3) entnommen.

Das entscheidende Kriterium dieser Versuche war die gute Wiedergabe der Form des Musters, diese aber hängt im Wesentlichen von der Phasenverschiebung der Oberwellen gegenüber der Grundwelle ab. Die Verschiebung

*)
Trotz dieser Bedenken war es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, größere Ausschnitte zum Auswerten heranzuziehen, weil einerseits die Maschinenzeit für die teilweise sehr aufwendigen Rechenverfahren an der IBM 650 begrenzt war, andererseits der Zeitaufwand für das Ablesen der einzelnen Amplitudenwerte und das Stanzen in Lochkarten in Grenzen bleiben mußte. Allein für diese Versuche wurden etwa 15 000, für alle im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Analysen, etwa 60 000 Einzelwerte abgelesen und auf Lochkarten übertragen.

der Grundschiwingung entspricht lediglich der des ganzen Musters gegenüber der Vorgabe. Der Vergleich beider Muster muß sich demzufolge vorwiegend auf die Phasen konzentrieren. (Tabelle 2)

Der Vergleich des Unterschieds der Mittelwerte bringt für die Versuche mit geschlossenem System nur bei einer Grundfrequenz von 1,0 Hz für alle Komponenten ausreichende statistische Sicherheit. Der Vergleich der Streuungen ergibt jedoch sowohl für die Versuche unter Sicht als auch für die Dunkelversuche trotz geringerer Anzahl der Fälle ein eindeutig besseres Verhalten bei einfachem Muster. Auch der Vergleich der Mittelwerte mit dem Sollwert fällt im geschlossenen System zuungunsten des komplizierten Musters aus. Dieser Befund tritt jedoch nicht bei den Dunkelversuchen auf.

Der Vergleich der Amplitudenwerte der Folgekurven zeigt im Wesentlichen für beide Muster das gleiche Bild. Gegenüber der Vorgabeamplitude sind die Amplituden der Folgebewegungen meist verkleinert und weisen eine gewisse Abhängigkeit von der Frequenz auf. Beide Oberwellen haben bei den Versuchen mit 1,0 Hz Grundfrequenz kleinere Amplituden als die entsprechenden Oberwellen bei 0,5 Hz, besonders deutlich zu sehen bei der 2. Oberwelle mit den Frequenzen von 3,0 Hz bzw. 1,5 Hz. Diese Beobachtung gilt auch für die Dunkelversuche.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen des offenen Systems, so fällt ein wesentlicher Unterschied auf: Die Folgeamplituden der Oberwellen sind fast durchweg gegenüber der Vorgabe vergrößert. Die 2. Oberwelle, die diesen Anstieg besonders deutlich zeigt, liegt bis zu 80% über dem Sollwert.

Die Amplituden der Grundwellen, die in beiden Systemen ungefähr das gleiche Bild ergeben, weisen auffallenderweise beim komplizierten Muster meist größere Werte auf als beim einfachen, die vielfach sogar über den Wert der Sollamplitude hinausgehen.

Als Drittes untersuchten wir, ob bei den Folgekurven die vorgegebene Frequenz für das Gesamtmuster eingehalten wird. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 aufgetragen. Solange die Vpn. Sicht auf das Vorgabemuster hatten, ergaben sich nur geringe Streuungen um den Sollwert, da größere Abweichungen sofort durch den Vergleich mit der Vorgabe wieder korrigiert wurden. So sieht man für 0,5 Hz keinen Unterschied zwischen einfach und kompliziert, jedoch bei 1,0 Hz streut das komplizierte Muster deutlich stärker um den Sollwert als das einfache.

Anders liegen die Verhältnisse bei den Dunkelversuchen. Hier hat die Vp. keine Möglichkeit mehr mit der Vorgabe zu vergleichen. Während bei 0,5 Hz manche Vpn. noch erstaunlich gut in der Lage sind die Frequenz über längere Zeit im Bereich des Sollwerts zu halten, liegen bei 1,0 Hz die meisten Antwortfrequenzen unter dem Sollwert und so zeigt sich eine fortlaufende Verschiebung der Folgekurve gegenüber der Vorgabe.

Die nächste Frage lautete nun: Wie verhält sich die Folgebewegung der Hand, bei Vorgabe von Erregungsmustern die aus noch mehr Sinusschwingungen zusammengesetzt sind? MAYNE (6), TUSTIN (11), ELLSON (2) sowie STARK und Mitarbeiter (9) haben darauf hingewiesen, daß sich hierbei die Reaktion des Systems, wie oben schon erwähnt, grundlegend ändert. Alle Untersucher analysierten die Folgebewegung jedoch nur auf die Frequenzen hin, die auch in der Vorgabe enthalten waren. Da aus den Versuchen von ALTROCK (1) jedoch bekannt ist, daß die höheren Zentren auch in der Lage sind eigene Frequenzen zu generieren, ermittelten wir aus den folgenden Versuchen nicht nur die Amplitudenwerte für die Frequenzen die wir vorgegeben hatten, sondern das kontinuierliche Leistungsspektrum.

Wir begannen mit einer Vorgabe, die aus einer Grundschwingung mit ihren vier ersten Oberwellen gemischt war, also mit einem periodischen Muster. Die Frequenz der Grundschwingung wählten wir mit 0,25 Hz, 0,5 Hz, 0,75 Hz und 1,0 Hz. Im Verlauf der Versuche wurde für eine Zeitlang jeweils die 1. Oberwelle, die 3., die 1. und 3. sowie die 2. und 4. Oberwelle weggeschaltet, sodaß sie im Gesamtmuster nicht mehr enthalten waren. Zwischen diesen Stücken wurde immer wieder das vollständige Muster angeboten. (Abb.8) Bei der niedrigsten Grundfrequenz wurden die in der Vorgabe enthaltenen Frequenzen einwandfrei wieder ausgegeben. Die Amplituden der höheren Frequenzen zeigten jedoch häufig eine Vergrößerung (Abb.9). Wurden Oberwellen weggeschaltet, so traten sie im Allgemeinen in der Folge auch nicht mehr auf (Abb.10). Bereits bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0,5 Hz ergab sich für die höheren Frequenzanteile eine deutliche Amplitudenverkleinerung gegenüber der Vorgabe, und wenn die Frequenzen auch meist noch getroffen wurden, so waren in einigen Fällen bereits Frequenzverschiebungen und manchmal zusätzliche Amplitudengipfel zu finden (Abb.11). Diese Befunde verstärkten sich mit zunehmender Schwingungszahl des Musters. Oft wurde nur noch eine der vorgegebenen Komponenten getroffen, in vielen Fällen wurde keine mehr richtig nachgebildet (Abb.12).

Die Berechnung der Phasenverschiebung der vier Oberwellen gegenüber der Grundwelle, als weiteres Kriterium für die Folgeleistung, ergibt mit ansteigender Frequenz eine deutliche Zunahme der Phasenfehler, die unregelmäßig sowohl negativ als positiv sein können. Die Fähigkeit zum genauen Einhalten des Musters nimmt mit zunehmender Frequenz ab.

Wir ermittelten nun noch die Phasenverschiebungen der Antwortkurven gegenüber der Vorgabe, d.h. wir bestimmten für den Ausgangspunkt unserer Auswertung

die Phasenlage jeder einzelnen Komponente für die Vorgabe und die Folge und bildeten die Differenz zwischen beiden. Hierbei nahmen wir keine Rücksicht auf die GröÙen der Amplituden mit der diese Komponenten in der Antwort auftraten; auch bei sehr kleiner Folgeamplitude wurde die Phasenverschiebung festgestellt. Wie Abb. 13a zeigt, läÙt sich für das periodische Erregungsmuster keine eindeutige Aussage über das Verhalten der Phasenverschiebung machen. Mit ansteigender Frequenz beobachtet man lediglich eine Neigung zu stärker nachteilenden Phasenwinkeln.

In der letzten Reihe unserer Versuche arbeiteten wir mit einem nichtperiodischen Muster (Abb.14). Schon bei einer Grundfrequenz von 0,25 Hz sieht man, daÙ die einzelnen Schwingungskomponenten zwar gut getroffen werden, aber die Amplitudengipfel nicht so scharf abgesetzt sind, wie das bei dem periodischen Muster der Fall war. (Abb.15) Auffallend war das Auftreten weiterer Gipfel in Bereichen oberhalb der höchsten enthaltenen Frequenz, die wir mehrfach feststellten (Abb.16). Erhöhten wir die Grundfrequenz auf 0,5 Hz so ergaben die Leistungsspektren schon deutlich, daÙ die Vpn. nicht mehr in der Lage waren, noch einwandfrei zu folgen. Die einzelnen Frequenzen wurden nur selten genau getroffen, meist waren die Gipfel verschoben und vielfach breitbasig und verwaschen (Abb.17). Auch wenn einmal eine gute Folgeleistung erzielt wurde, so traten zusätzlich bei nicht im Muster enthaltenen Frequenzen, Amplitudengipfel auf. Die Versuchsergebnisse mit einer Grundfrequenz von 1,0 Hz (Hier dann höchste enthaltene Komponente 6,2 Hz) waren durchweg schlecht. In einer Reihe von Ergebnissen traten keine deutlich herausragenden Amplitudenwerte mehr im Leistungsspektrum auf, oder es ergab sich ein Bereich in den die Folgefrequenzen hauptsächlich zu liegen kommen, der dann aber eine breite Basis mit mehreren Gipfeln aufweist (Abb.18)

Auch hier wurden neben den Amplituden und dem Frequenzverhalten die Phasenverschiebung der Einzelkomponenten der Folgebewegung gegenüber der Vorgabe berechnet. Die Ergebnisse zeigt Abb. 13b. Für das Phasenverhalten bestätigen sich weitgehend die Ergebnisse früherer Untersucher. Die Phasenwinkel eilen mit zunehmender Frequenz immer stärker nach. Die Amplituden zeigen auch hier bei niedriger Grundfrequenz einen Anstieg für die höheren Komponenten, bei den weiteren Versuchen tritt im Mittel eine gleichmäßige Amplitudenverkleinerung auf, die bei 1,0 Hz Grundfrequenz nur noch etwa 10% des Sollwertes beträgt.

Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der beschriebenen Ergebnisse gestaltet sich insofern etwas schwierig, als Tatsachen, die entscheidend von der bisher zu Grunde gelegten einfachen linearen Systemtheorie abweichen, zunächst einzeln dargestellt werden sollen, andererseits manche Befunde erst in zusammenhängender Darstellung ihre Bedeutung gewinnen. Im Verlauf der Diskussion werden die Ergebnisse mehr und mehr in die Vorstellung vom Regelsystem der Handbewegung einbezogen und abschließend im Zusammenhang besprochen werden. Die experimentellen Befunde unserer Versuche mit "einfachem" und "kompliziertem" Erregungsmuster, haben deutlich gezeigt, daß dem einfachen Muster besser gefolgt wird als dem komplizierten. Diese Ergebnisse berechtigen zu der Annahme, daß es sich bei den höheren Zentren im Regelkreis der Handbewegung nicht um passive lineare Filter handelt, sondern daß die zusammengesetzten periodischen Erregungsmuster vielmehr ganz in ihrem Ablauf erfaßt, oder zu erfassen versucht werden. Dieses so gewonnene Bild von dem Erregungsmuster wird dann zur Bildung der Folgebewegung herangezogen. Hierfür spricht vor allen Dingen die Fähigkeit, auch während der Dunkelversuche die seitherige Bewegung fortzuführen. Bis zu welchem "Schwierigkeitsgrad" die Zentren in der Lage sind, solche Vorgänge noch richtig aufzufassen und wiederzugeben, scheint nur vom Zeitverlauf des Erregungsmusters abzuhängen, d.h. das Bild der Kurve und die Geschwindigkeit ihres Ablaufs sind hierfür bestimmend.

So wird das einfache Erregungsmuster bei einer Grundfrequenz von 0,5 Hz von den meisten Vpn. zu Beginn des Versuchs bereits nach zwei bis drei Perioden richtig erkannt. Auch in den Versuchen mit 1,0 Hz Grundfrequenz werden nur wenige Perioden gebraucht, um die Vorgabe richtig zu erfassen; hier ist allerdings die Folgeleistung im Allgemeinen nicht so kon-

stant und das Kurvenbild nicht so gut wie bei lang-samer Vorgabefrequenz. Die Versuche mit kompliziertem Muster zeigen bei 0,5 Hz Grundfrequenz noch gute Folgeleistungen. Die Zeit die am Anfang eines jeden Versuchs benötigt wird, um das Muster richtig nach-bilden zu können, ist jedoch erheblich länger (Abb. 4). Erhöht man die Grundfrequenz auf 1,0 Hz, so sind die meisten Vpn. nicht mehr in der Lage die-sem Vorgabemuster richtig zu folgen. Hier erweist sich der Zeitverlauf des Erregungsmusters bereits als zu schwierig, um noch exakt beantwortet werden zu können. In diesen Fällen helfen sich die Vpn. un-bewußt, um der Vorgabemarke wenigstens ungefähr folgen zu können, mit einer "Vereinfachung" der Folgebewegung, sie orientieren sich nach den markanten Punkten der Vorgabe und lassen die dazwischenliegen-den kleineren Maxima- und Minimapunkte aus. Diese Beobachtung gilt in kleinerem Umfange auch für die Versuche mit 0,5 Hz Grundfrequenz. Die Orientierung an deutlich zu erkennenden Punkten des Erregungs-musters führte hier zu einer Amplitudenvergrößerung im Bereich des Maximums und des Minimums der Folge-kurve. Da die Grundwelle für diese Punkte vorwiegend die Amplitude bestimmt, erklärt sich so ihre Vergrößerung im komplizierten Muster.

Die Ergebnisse der Dunkelversuche machen es sehr wahrscheinlich, daß, wie auch von der einfachen Si-nusbewegung, von diesen verhältnismäßig leicht zu Überblickenden Erregungsmustern ein Bild im Zentrum gespeichert wird. Anders ist die oft sehr gute und langanhaltende Weiterführung des Bewegungsmusters wohl nicht zu erklären. Die Speicherleistung der höheren Zentren scheint jedoch eng mit der Erkennungs-fähigkeit für die verschiedenen Muster gekoppelt zu sein, denn das einfache Muster wird genauer und mitunter auch länger weitergeführt als das komplizierte. Während das Bild der Kurve noch richtig wiedergegeben

wird, kann jedoch bei beiden Mustern die Frequenz einer Periode nicht mehr genau eingehalten werden. Es zeigen sich starke Streuungen um den Sollwert, vorwiegend in den Bereich langsamer Frequenzen, (Abb. 7) ein weiterer Hinweis für die Speicherung des ganzen Musters. Das Erinnerungsvermögen für den Verlauf des Erregungsmusters erscheint sehr viel besser als für die Frequenz mit der es angeboten wird. Wir beobachteten sogar bei hohen Frequenzen, daß manche Vpn. die Geschwindigkeit ihrer Folgebewegung deutlich senkten, um das Muster besser nachzubilden zu können; nicht die Frequenz sondern das Bild des Musters ist für die Speicherung entscheidend.

Bei ihren Untersuchungen mit einfachen Sinusschwingungen hatten ALTROCK (1) und andere Untersucher festgestellt, daß sich zu Beginn eines Versuchs, aus einem Phasennachhalt zwischen Vorgabe- und Folgebewegung, ein Phasengleichlauf oder gar ein Phasenvorhalt entwickelt. Für unsere Versuche mit einfachem und kompliziertem Muster trifft die gleiche Beobachtung zu. Sobald das Muster erkannt ist, stellt sich auch der Phasenvorhalt ein. (Abb. 3 und 4) Dies gilt in beschränktem Umfange auch für die Versuche, in denen eine vorgabegetreue Musterwiedergabe nicht mehr erfolgt. Hier tritt der Phasenvorhalt nur noch für die Teile der Folgekurve auf, die noch eine Beziehung zu der Vorgabe, wie die oben erwähnten markanten Punkte, haben, ist für diese aber deutlich ausgeprägt. Die Ausbildung dieses Phasenvorhalts, die Folge der Predictionseigenschaft der höheren Zentren, unterstützt unsere Annahme, daß von diesen Erregungsmustern ein Bild im Zentrum gespeichert wird.

Die Versuche mit aufgetrenntem äußeren Regelkreis (sog. offenes System) lassen erkennen, daß zur Nachbildung der Erregungsmuster die Kontrolle der Hand durch das Auge nur eingeschränkt erforderlich ist.

Die Vorgabe wird in ihren Charakteristika richtig erfaßt und reproduziert, aber die Amplitude des ganzen Musters steigt als Ausdruck der ausgefallenen Korrektur der Handbewegung stark an.

Diese Versuche wiesen deutlich darauf hin, daß zusammengesetzte Erregungsmuster einfacherer Form im Ganzen aufgenommen und sodann durch einen quasi aktiven Prozess nachgebildet werden. Dieses Bild wird gespeichert und ermöglicht auf diese Weise eine Vorhersage des weiteren Musterverlaufs. Hier lag nun die Frage nahe: Wie verhält sich die Folgeleistung, wenn man eine größere Zahl harmonischer Schwingungen mischt und damit ein ebenfalls periodisches aber schwerer zu übersehendes Erregungsmuster anbietet ?

Das von uns verwendete Muster, durch Mischung einer Grundwelle und ihrer ersten vier Oberwellen gewonnen, läßt erkennen, daß mit zunehmender Frequenz das Bild des Erregungsmusters in der Folgebewegung mehr und mehr zerfällt (Abb. 11 und 12), wie es auch beim "komplizierten" Muster bei hoher Geschwindigkeit schon zu sehen war. Die Vpn. sind auch nicht mehr in der Lage, die Folgebewegung bei ausgeschalteter Vorgabe- und Folgemarke und geschlossenen Augen, im Sinne der Dunkelversuche, richtig weiterzuführen. Die Zeit, die während der Versuche zur Verfügung stand, um das Erregungsmuster zu lernen (sie entsprach etwa derjenigen bei unserer ersten Versuchsreihe) reichte nicht aus, um das Muster zu analysieren und ein genügend genaues Bild zu speichern. Wie Abb. 8 zeigt, kommt trotzdem eine gute, und für niedrige Frequenzen eine gering voreilende Folgebewegung zustande. Hier liegen wahrscheinlich verschiedene sich überlagernde Mechanismen vor, die zur Bildung der Folgebewegung herangezogen werden. Wenn das gespeicherte Bild auch nicht für die Weiterführung der Bewegung aus dem Gedächtnis ausreicht, so scheint auch hier

das Erinnerungsvermögen für den Kurvenverlauf, wie es sich bei den Versuchen mit einfachem und kompliziertem Muster so deutlich ergab, entscheidend zu sein. Das zeigt sich an dem noch eingehender zu besprechenden Phasenverhalten zwischen Vorgabe- und Folgebewegung.

Auch bei diesen Versuchen kommt deutlich zum Ausdruck, wie sich die Vpn. an markanten Kurvenpunkten orientieren, deren Wiederkehr erstaunlich schnell richtig vorhergesagt werden kann. Die zwischenliegenden Abschnitte werden zunächst nur einfach mit einer Bewegung "ausgefüllt" und erst nach und nach verbessert sich auch hier die Folgeleistung. Deshalb scheint selbst bei diesen schon ziemlich schwer zu übersehenden Kurvenbildern die Vorstellung vom Gesamtverlauf des Musters, eine Vorhersage über längere Zeit, die dominierende Rolle zu spielen.

Zu dieser Langzeitvorhersage kommt jedoch noch eine Kurzzeitvorhersage, die lediglich die augenblickliche Tendenz der Bewegung zur Vorhersage benutzt und so Phasenfehler korrigieren und zur besseren Musterwiedergabe dienen kann. Andererseits stellt sie eine Fehlerquelle dar, da Irrtümer in der Vorhersage auftreten können, was sich weniger bei diesen periodischen als bei nichtperiodischen Mustern ausdrückt.

Wenn diese beiden Vorhersagemechanismen durch noch komplizierteres Muster oder Erhöhung der Frequenz zunehmend insuffizient werden, so wird die Folgeregelung zum führenden Element für die Bildung der Antwort. Für alle erwähnten Arten die Folgebewegung auszuführen lassen sich in unseren Kurven Beispiele finden.

Bei langsamem Ablauf des Vorgabemusters, werden alle Frequenzen noch sauber getroffen. Die Amplitudenvergrößerung mit zunehmender Frequenz der Oberwellen, könnte Ausdruck eines zu groß gewählten Ausschlags, d.h. einer Überbewertung der kleineren Maxima- und

Minimumpunkte im Verlauf der Kurve sein. Abb.8 läßt die Vergrößerung der Amplitude an diesen Punkten gut erkennen. Wenn aus der Vorgabe Frequenzen ausgelassen werden, so erscheinen sie in der Folge ebenfalls nicht mehr. Die Änderung des Kurvenbildes hierdurch wird erkannt und die Folgebewegung entsprechend umgestellt.

Sowohl die Amplitudenvergrößerung als auch das Auslassen weggeschalteter Frequenzen in der Folgekurve findet sich nicht ganz regelmäßig. Ausnahmen, wie das Auftreten von großen Amplitudenwerten auch bei niedriger Frequenz oder von weggeschalteten Frequenzen, waren durchaus zu beobachten. Dieses Fehlen einer strengen Gesetzmäßigkeit in den Versuchen weist ebenfalls darauf hin, daß die Regelung der Handfolgebewegung kein einfacher passiver Vorgang ist.

Mit ansteigender Frequenz, wenn die oben erwähnten Vorhersagemechanismen mehr und mehr unwirksam werden und eine Speicherung des Musters nur noch sehr unvollkommen erfolgt, fallen die Amplitudenwerte der Antwortkurve zunehmend ab. Die höchsten vorgegebenen Frequenzen treten in der Folgebewegung oft nicht mehr auf. Wird die Frequenz noch weiter erhöht, so verstreicht das Leistungsspektrum und einzelne Amplitudengipfel sind nur noch angedeutet vorhanden (Abb.12). Schon bei diesen Versuchen fällt auf, daß sich in den Leistungsspektren der Folgebewegung Amplitudengipfel bei Frequenzen finden, die in der Vorgabe nicht enthalten waren (Abb.11). Sie treten schon bei Frequenzen unterhalb von 3 Hz auf, während ALTROCK (1) bei seinen Versuchen mit einfachen Sinusschwingungen nur oberhalb dieser Grenze eigene Folgefrequenzen feststellte. Dieser Befund drückt die Unfähigkeit der Vpn. aus, das Muster noch richtig zu erkennen und wiederzugeben. So verliert die Folgebewegung die genaue Beziehung zur Vorgabe. Selbst die markanten Anhaltspunkte werden falsch erfaßt, und das Bemühen, durch

"irgendeine" möglichst ähnliche Folgebewegung der Vorgabe weitgehend nahe zu kommen, führt dann zur Entstehung eigener neuer Frequenzen in der Antwortkurve. Die in Abb. 13a aufgetragenen Phasenbeziehungen der einzelnen Frequenzen zwischen Vorgabe- und Folgebewegung für die Versuche mit einer Grundfrequenz von 0,25, 0,5 und 0,75 Hz unterstreichen das Besprochene. Während für niedrige Frequenzen der Phasenfehler nahe 0° bleibt, zeigt sich mit zunehmender Frequenz eine Tendenz zum Phasennachhalt, der jedoch bei weitem nicht die Ausmaße annimmt, wie sie sich bei den noch zu besprechenden Versuchen mit nichtperiodischen Mustern fanden. Bei den von uns untersuchten Frequenzen scheint eine Langzeitvorhersage immer noch in geringem Maße möglich zu sein, da sonst für den Phasennachhalt größere Werte zu erwarten gewesen wären.

Ganz andere Verhältnisse ergaben die Versuche mit nichtperiodischen Erregungsmustern, deren Ablauf von den Vpn. nicht vorhergesagt werden konnte, da Wiederholungen über Zeiträume von Stunden nicht auftraten. In diesem Fall muß die Predictioneigenschaft der höheren Zentren ausfallen. Würden die Zentren eine Frequenzanalyse vornehmen, so müßte eine Vorhersage genauso möglich sein, wie bei den periodischen Mustern, denn auch hier sind nur fünf Sinusschwingungen gemischt. Bei diesen nichtperiodischen Mustern liegt also kein statistischer Vorgang vor, denn nach Ablauf der langsamsten Frequenz ist alles über die enthaltenen Schwingungskomponenten ausgesagt. Doch sind die höheren Zentren augenscheinlich nicht in der Lage, hieraus eine Langzeitvorhersage im Sinne einer echten Musternachbildung zustande zu bringen, sondern auch hier zeigt sich, daß sie nur den Zeitverlauf der zusammengesetzten Kurve aufnehmen können. So erfolgt die Ausführung der Folgebewegung überwiegend nach dem Modus einer Folge-regelung. Dies kommt in dem Phasenverhalten zwischen Vorgabe und Folge deutlich zum Ausdruck. Abb.13 zeigt,

daß hier schon von vornherein ein Phasennachhalt auftritt und wie er mit zunehmender Frequenz stark ansteigt. Diese Befunde bestätigen die Ergebnisse anderer Untersucher wie ELLSON (2), TUSTIN (11) und STARK (9).

Neben der Folgeregelung wird zu Beginn der Versuche von den Vpn. auch eine Kurzzeitvorhersage versucht, die jedoch im weiteren Verlauf wieder verlassen wird. Das scheint seinen Grund darin zu haben, daß neben sinnvollen Vorhersagen, bei schneller Änderung der Bewegungstendenz häufig Fehler auftreten, die dann eine zusätzliche Korrektur erfordern, sich also als Störung auswirken. Deshalb enthalten sich die Vpn. schon bald dieser Vorhersagemöglichkeit und gehen zu einer reinen Folgeregelung über.

Die Leistungsspektren zeigen bei den nichtperiodischen Mustern für langsame Frequenzen eine gute Genauigkeit, die Amplitude ist gegenüber den Versuchen mit periodischem Muster jedoch deutlich verkleinert. Das Kurvenbeispiel in Abb. 14 läßt die Amplitudenverkleinerung ebenfalls gut erkennen. Zusätzliche Amplitudengipfel treten hier schon bei den Versuchen mit 0,25 Hz Grundfrequenz auf. Besonders auffallend sind die Frequenzen oberhalb der höchsten in der Vorgabe enthaltenen. (Abb. 16) Diese Frequenzen sind wohl als Ausdruck der dauernden Korrekturbewegungen zu deuten, die durch die Unvorhersagbarkeit des Musters und fehlerhafter Kurzzeitvoraussage in großem Umfange nötig sind. (Abb. 14)

Mit zunehmender Frequenz fällt auch bei nichtperiodischem Muster die Folgeamplitude stark ab; bereits bei 0,5 Hz Grundfrequenz werden die vorgegebenen Frequenzen nur noch selten getroffen, bei 1,0 Hz ist die Frequenzabhängigkeit völlig verloren gegangen. Die Vpn. sind nicht mehr in der Lage dem vorgegebenen Muster auch nur noch annähern zu folgen. (Abb. 17,18)

Zusammenfassend lassen sich die geschilderten Befunde, auch unter Einbeziehung der Ergebnisse bei Vorgabe einfacher Sinusschwingungen (ALTROCK) (1), folgendermaßen darstellen:

Bei Vorgabe von Erregungsmustern verhältnismäßig einfachen Aufbaus, wie es die sinusförmige Bewegung oder das hier besprochene "einfache" bzw. "komplizierte" Muster darstellen, erfolgt die Beantwortung des Musters mit einem deutlichen Phasenvorhalt gegenüber der Vorgabe. Der Vorhalt stellt sich zu Beginn des Versuchs in unterschiedlich langer Zeit ein, die vom Schwierigkeitsgrad des Musters abhängt. Die Qualität der Wiedergabe nimmt mit ansteigender Frequenz des Musters ab. Es ist deshalb anzunehmen, daß in den höheren Zentren für die Regelung der Handbewegung zunächst eine Analyse des Musters vorgenommen wird, wobei der Verlauf des Kurvenbildes das entscheidende Kriterium ist. Auf Grund dieser Analyse erfolgt eine quasi aktive Nachbildung des Erregungsmusters, das sodann als Stellbefehl an die niederen Zentren der Handbewegung weitergeleitet wird. Gleichzeitig wird das Bild dieses Musters gespeichert und ermöglicht so bei seiner Wiederholung eine Vorhersage über den Ablauf. Fehler, die bei der Beantwortung des Erregungsmusters auftreten, werden durch die Korrektur des schon in früheren Arbeiten (VOSSIUS) (15,17) besprochenen Tastfilters ausgeglichen. Dieser Zweig des Systems dient dann auch zur Korrektur des gespeicherten Bildes.

Nehmen periodische Erregungsmuster an Schwierigkeit zu, so erlischt die Fähigkeit zur Analyse und damit zur aktiven Musternachbildung immer mehr. Trotzdem muß auch hier, für die von uns untersuchten Frequenzen, eine Langzeitvorhersage in gewissem Umfange immer noch angenommen werden, da ein größerer Phasennachhalt zwischen Vorgabe und Folge nicht auftritt. Für die nichtperiodischen Muster ist die

Folgeregelung als Überwiegendes Element zur Bildung der Antwort anzunehmen, denn die Predictionseigenschaft der Zentren geht durch die Unvorhersagbarkeit des Musters und damit durch die Unfähigkeit zur Musteranalyse verloren. Eine Kurzzeitvoraussage, bei periodischen Erregungsmustern zur Korrektur der Folgebewegung herangezogen, wird bei den nichtperiodischen Mustern bald verlassen, weil sie sich vorwiegend als Störung auswirkt.

Als Ausdruck zunehmender Schwierigkeit in der Beantwortung der Vorgabe fallen die Amplituden der Antwortfrequenzen mehr und mehr ab, vorgegebene Frequenzen treten in der Antwort nicht mehr auf, und als besonderes Kriterium finden sich zusätzliche Amplitudengipfel für nicht vorgegebene Frequenzen. Für nichtperiodische Muster ergibt sich ein zunehmend starker Phasennachhalt.

Auf Grund dieser Befunde läßt sich das Regelsystem der Handbewegung, wie in Abb. 19 dargestellt aufbauen:

Das Erregungsmuster wird in der Netzhaut aufgenommen und über die optischen Bahnen den höheren Zentren zugeleitet. Hier teilt sich der Kreis in zwei Zweige auf. Im ersten wird der Kurvenverlauf zunächst durch ein kontinuierlich arbeitendes Filter erfaßt, das zur Musteranalyse dient. In nächsten Glied wird das Muster auf Grund der Analyse neu gebildet und zur Ausgabe an die Rückenmarkszentren weitergeleitet.

An die Musterausgabe ist der Speicher und damit die Vorhersage gekoppelt. Der zweite Zweig dient der Fehlerkorrektur, und gleicht dem früher von VOSSIUS beschriebenen. Der Korrektursprung wird lediglich noch zur Verbesserung des Musterbildes dem Zentrum für die Musteranalyse übermittelt. Nachdem die beiden Zweige wieder vereinigt sind geht der Stellbefehl an die Zentren des Rückenmarks und wird von dort den Armmuskeln übermittelt. Die Kontrolle der Armbewe-

gung durch die Retina schließt den äußeren Regelkreis. Die Ausführung der Bewegung selbst, wird durch den Unterregelkreis Propriozeptoren - Rückenmarkszentren - Muskulatur überwacht.

Diese Darstellung des Regelsystems auf Grund unserer Untersuchungen trägt verständlicher Weise noch hypothetische Züge; eine genauere Bezeichnung der einzelnen Funktionen wird erst möglich sein, wenn sich unser Einblick in die Fähigkeiten des Zentralnervensystems kompliziertere Erregungsmuster zu verarbeiten noch viel weiter vertieft hat.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Das Folgeverhalten der menschlichen Handbewegung bei Vorgabe von zusammengesetzten Erregungsmustern wurde nach regeltechnischen Gesichtspunkten untersucht. Hierzu wurden drei Versuchsreihen durchgeführt:

1. Vorgabe von zwei verschiedenen periodischen Erregungsmustern, zusammengesetzt aus einer Grundschiwingung und ihren zwei ersten harmonischen Oberwellen. Durch unterschiedliche Wahl der Phasenlage entstand ein sog. "einfaches" und ein sog. "kompliziertes" Muster.
2. Vorgabe eines periodischen Erregungsmusters aus der Mischung von fünf Schwingungen gewonnen.
3. Vorgabe eines nichtperiodischen Erregungsmusters, ebenfalls aus fünf Schwingungen aufgebaut.

Durch Auswertung der Versuchsdaten auf einem elektronischen Digitalrechner wurde der Frequenzinhalt, die Amplituden sowie das Phasenverhalten der Antwortkurven ermittelt.

Die erste Versuchsreihe ergab eine bessere Folgeleistung bei Vorgabe des einfachen Musters; Ausdruck hierfür war vorwiegend der weit geringere Phasenfehler zwischen den einzelnen Komponenten dieses Musters. Zwischen Vorgabe und Folge bildet sich im Verlauf der Versuche ein Phasenvorhalt aus.

Bei zunehmendem Schwierigkeitsgrad oder ansteigender Frequenz der periodischen Muster fällt die Folgeleistung rasch ab. Die Folgeamplituden werden kleiner, und in den Leistungsspektren treten Frequenzen auf, die nicht vorgegeben wurden. Die Phasenabweichung von der Vorgabe bleibt in der Nähe von 0^0 , mit zunehmender

Frequenz bildet sich jedoch ein Phasennachhalt aus.

Die Versuche mit nichtperiodischem Muster erbrachten noch weniger gute Folgeleistungen. Die Amplitudenwerte sind kleiner als die entsprechenden bei periodischem Muster; der Phasennachhalt erreicht mit wachsender Frequenz sehr große Werte.

Diese Befunde werden als Ausdruck einer quasi aktiven Musternachbildung und -speicherung bei periodischen Erregungsmustern angesehen. Hierdurch ist auch eine Möglichkeit zur Vorhersage gegeben. Bei nichtperiodischen Mustern muß vorwiegend eine Folgeregelung angenommen werden.

Abschließend wird eine Möglichkeit für den Aufbau des Regelsystems der Handbewegung gegeben.

Herrn Prof. Dr. K. WEZLER, dem Direktor des Instituts für Animalische Physiologie der Universität Frankfurt am Main, darf ich an dieser Stelle für die gebotene Möglichkeit an seinem Institut arbeiten zu dürfen und für die großzügige Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten meinen herzlichen Dank aussprechen.

Herrn Priv. Doz. Dr. G. VOSSIUS, dem ich die Überlassung des interessanten Themas verdanke, bin ich für sein Entgegenkommen und seine stets freundliche Hilfe bei der Erstellung des Versuchsaufbaus sowie bei der Durchführung der Berechnungen und der statistischen Auswertung zu besonderem Dank verpflichtet.

T A B E L L E 1

			A_1	A_2	A_3
Normwerte	E		1,19	1,17	1,13
E geschl. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	+0,12	-0,17	-0,13
45		s	0,261	0,221	0,224
Fälle	1,0 Hz	$\bar{x}$	+0,01	-0,20	-0,40
		s	0,644	0,657	0,395
E du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-0,18	-0,11	+0,18
27 Fälle		s	0,245	0,219	0,217
	1,0 Hz	$\bar{x}$	-0,02	-0,27	-0,25
24 Fälle		s	0,841	0,212	0,451
Normwerte	K		1,07	1,06	1,10
K geschl. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	+0,02	-0,13	-0,15
45		s	0,351	0,392	0,420
Fälle	1,0 Hz	$\bar{x}$	+0,19	-0,19	-0,46
		s	0,613	0,396	0,272
K du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	0,00	-0,07	+0,01
27 Fälle		s	0,235	0,241	0,331
	1,0 Hz	$\bar{x}$	+0,27	-0,12	-0,54
24 Fälle		s	0,532	0,380	0,268
Normwerte	E		1,13	1,16	1,18
E off. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-0,16	+0,09	+0,54
10		s	0,442	0,292	0,263
Fälle	1,0 Hz	$\bar{x}$	-0,18	+0,13	+0,40
		s	0,727	0,323	0,259
E du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-0,20	+0,13	+0,83
10		s	0,370	0,192	0,219
Fälle	1,0 Hz	$\bar{x}$	-0,25	-0,02	+0,67
		s	0,609	0,348	0,482
Normwerte	K		1,09	1,12	1,13
K off. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	+0,30	+0,19	+0,51
10		s	0,472	0,298	0,315
Fälle	1,0 Hz	$\bar{x}$	+0,54	+0,41	+0,22
		s	0,933	0,257	0,217

				A ₁	A ₂	A ₃
K	du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-0,07	-0,12	+0,66
			s	0,398	0,235	0,458
	Fälle	1,0 Hz	$\bar{x}$	+0,52	+0,33	+0,43
			s	0,646	0,354	0,230
				Ph ₁	Ph ₂	Ph ₃
Normwerte E				0°	+92°	+183°
E	geschl. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	0	+5	-4
			s	16,3	23,9	37,9
		1,0 Hz	$\bar{x}$	+17	+8	-20
			s	41,2	25,1	49,3
E	du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-10	0	-8
			s	63,7	19,1	32,5
		1,0 Hz	$\bar{x}$	-8	-2	-30
			s	121,0	29,5	64,0
Normwerte K				0°	+274°	+274°
K	geschl. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	+8	+25	-22
			s	25,5	41,1	72,6
		1,0 Hz	$\bar{x}$	+98	-77	-54
			s	69,0	101,5	87,8
K	du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	+11	+19	-3
			s	78,9	37,8	78,8
		1,0 Hz	$\bar{x}$	+62	-23	-30
			s	124,0	106,8	99,3
Normwerte E				0°	+89°	+178°
E	off. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	+10	+8	+13
			s	20,5	18,8	32,8
		1,0 Hz	$\bar{x}$	+39	+30	+58
			s	17,0	24,0	51,3
E	du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-26	+23	+44
			s	52,1	30,0	56,0
		1,0 Hz	$\bar{x}$	+73	+39	+66
			s	113,0	28,6	69,6

			Ph ₁	Ph ₂	Ph ₃
Normwerte K			0°	266°	269°
K off. S.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-3	-10	-28
		s	15,7	41,1	55,4
	1,0 Hz	$\bar{x}$	+9	+32	-28
		s	84,2	20,2	78,1
K du. Vers.	0,5 Hz	$\bar{x}$	-49	+7	-34
		s	102,0	58,7	87,8
	1,0 Hz	$\bar{x}$	+103	+35	+15
		s	91,5	33,2	54,4

In Tabelle 1 sind die aus der Fourieranalyse der Vorgabe gewonnenen Werte als Norm für das einfache und das komplizierte Muster angegeben, sowie die Abweichungen vom Normwert und die zugehörigen Standardabweichungen für die Folgebewegungen. Bei den Phasen gibt ein positives Vorzeichen einen nacheilenden Phasenwinkel an. Zur Auswertung wurden die Formeln von GRAF und HENNING (3) verwendet.

E = einfaches Muster. K = kompliziertes Muster.

geschl. S. = geschlossenes System.

off. S. = offenes System mit abgedeckter Hand

du. Vers. = Versuche mit geschlossenen Augen

0,5 Hz bzw. 1,0 Hz gibt die Frequenz der Grundwelle an.

$\bar{x}$ = Abweichung des Mittelwertes vom jeweiligen Normwert.

s = Standardabweichung. A = Amplitude. Ph = Phase

T A B E L L E 2

Vergleich des Unterschiedes der Mittelwerte von

		A ₁	A ₂	A ₃
E geschl. S.	0,5 : 1,0	-	-	++
E du. V. geschl.S.	0,5 : 1,0	-	+	++
E 0,5 Hz	geschl.: off. S.	-	+	++
E 1,0 Hz	geschl.: off. S.	-	-	++
K geschl. S.	0,5 : 1,0	-	-	++
K du. V. geschl.S.	0,5 : 1,0	(+)	-	++
K 0,5 Hz	geschl.: off. S.	(+)	(+)	++
K 1,0 Hz	geschl.: off. S.	-	++	++
E du. V. 0,5 Hz	geschl.: off. S.	-	+	++
E du. V. 1,0 Hz	geschl.: off. S.	-	(+)	++
K du. V. 0,5 Hz	geschl.: off. S.	-	-	++
K du. V. 1,0 Hz	geschl.: off. S.	-	+	++

		Ph ₁	Ph ₂	Ph ₃
E geschl. S.	0,5 : 1,0	(+)	-	-
E geschl. S. du. V.	0,5 : 1,0	-	-	-
K geschl. S.	0,5 : 1,0	++	++	-
K geschl. S. du. V.	0,5 : 1,0	-	-	-
0,5 Hz geschl. S.	E : K	-	+	-
1,0 Hz geschl. S.	E : K	++	++	+

Unterschied der Streuungen von

0,5 Hz geschl. S.	E : K	+	++	++
1,0 Hz geschl. S.	E : K	+	++	++
0,5 du. V. geschl. S.	E : K	-	++	++
1,0 du. V. geschl. S.	E : K	-	++	(+)

Unterschied des Mittelwertes zum Sollwert

E geschl. S.	0,5 Hz	-	-	-
	1,0 Hz	+	(+)	+
K geschl. S.	0,5 Hz	(+)	++	(+)
	1,0 Hz	++	++	++

Angabe der Sicherheit des Unterschiedes für die verschiedenen statistischen Vergleiche, die mit den in Tabelle 1 angegebenen Werten durchgeführt wurden.

Sicherheit des Unterschieds:

-	=	95 %	
(+)	=	95 % und	99 %
+	=	99 % und	99,9 %
++	=	99,9 %	

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- 1) ALTROCK, W.: Inaugural Diss., Frankfurt/M. 1961
- 2) ELLSON, D.Y.: Psychol. Rev., 56,9; 1949 zit. nach (6)
- 3) GRAF, U. und H.J. HENNING : Formeln und Tabellen der mathemat. Statistik, Heidelberg 1958
- 4) KÜPFMÜLLER, K.: Arch. Elektr. Übertragung 7,71; 1953
- 5) KÜPFMÜLLER, K. und G. POKLEKOWSKI, Z. Naturforsch. 11b, 1; 1956
- 6) MAYNE, R.: Eletr. Eng. 70, 207; 1951
- 7) OPPELT, W.: Kleines Handbuch techn. Regelbor-
gänge, Weinheim 1954
- 8) SCHÄFER, O.: Grundlagen der selbsttätigen Rege-
lung, München 1957
- 9) STARK, L., M. IIDA und P.A. WILLIS, Biophysikal J.
1, 279; 1961
- 10) SÜNDERHAUF, A.: Klin. Monatsbl. f. Augenheilk.
136, 6 S. 837 - 852; 1960
- 11) TUSTIN, A.: Journ. Inst. of Elektr. Eng. (London)
94, part 11a, 190 zit. nach (6)
- 12) VOSSIUS, G.: Akad. d. Wiss. u. Lit. 4, 107 - 127; 1957
- 13) VOSSIUS, G. und A.S. CHOUDHRY; Pflügers Arch.
Bd. 268, S. 75 - 86, 1958
- 14) VOSSIUS, G.: Zeitschr. f. Biol., Bd. 112, Heft 1
S. 27 - 57, München 1960
- 15) VOSSIUS, G.: Naturwiss. Rundschau 13, Heft 12,
S. 465 - 469, Stuttgart 1960
- 16) VOSSIUS, G.: Kybernetik, Band 1, Heft 1, S.28 - 32
1961
- 17) VOSSIUS, G.: Aufn. u. Verarb. v. Nachr. durch
Organismen, S. 149 - 157, Stuttgart 1961

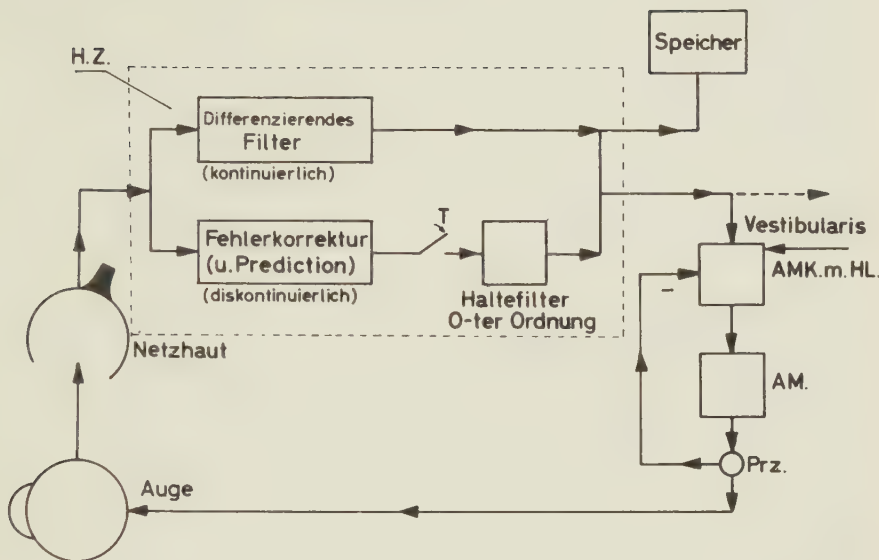


Abbildung 1.

Der Aufbau des Regelsystems der Augenbewegung.
(VOSSIUS) (17)

H.Z. = Höhere Zentren, AM. = Äußere Augenmuskeln,
AMK. m. HL. = Augenmuskelkerne mit Hinterem Längs-
bündel, Prz. = Propriorezeptoren.

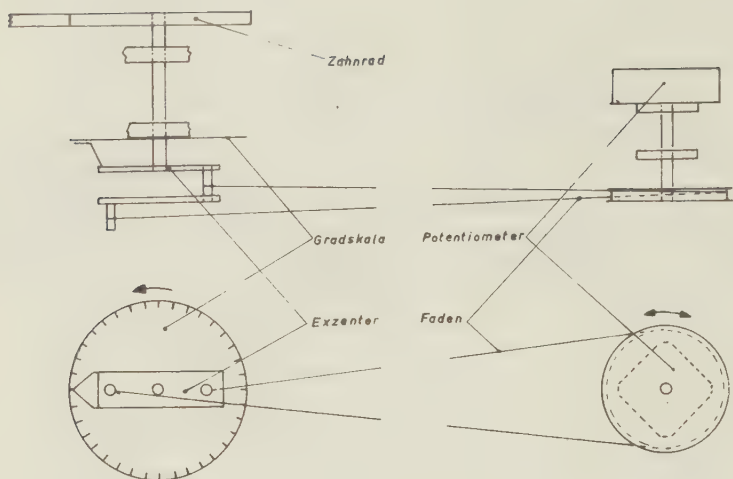


Abbildung 2.

Schematische Darstellung des Antriebs eines der Präzisionspotentiometer, die zur Erzeugung der zusammengesetzten Erregungsmuster dienten. Der Abstand zwischen Exzenter und dem Potentiometerantrieb betrug etwa 60 cm. Auf der Gradskala konnte die Phasenverschiebung der einzelnen Frequenzen zueinander direkt eingestellt werden.

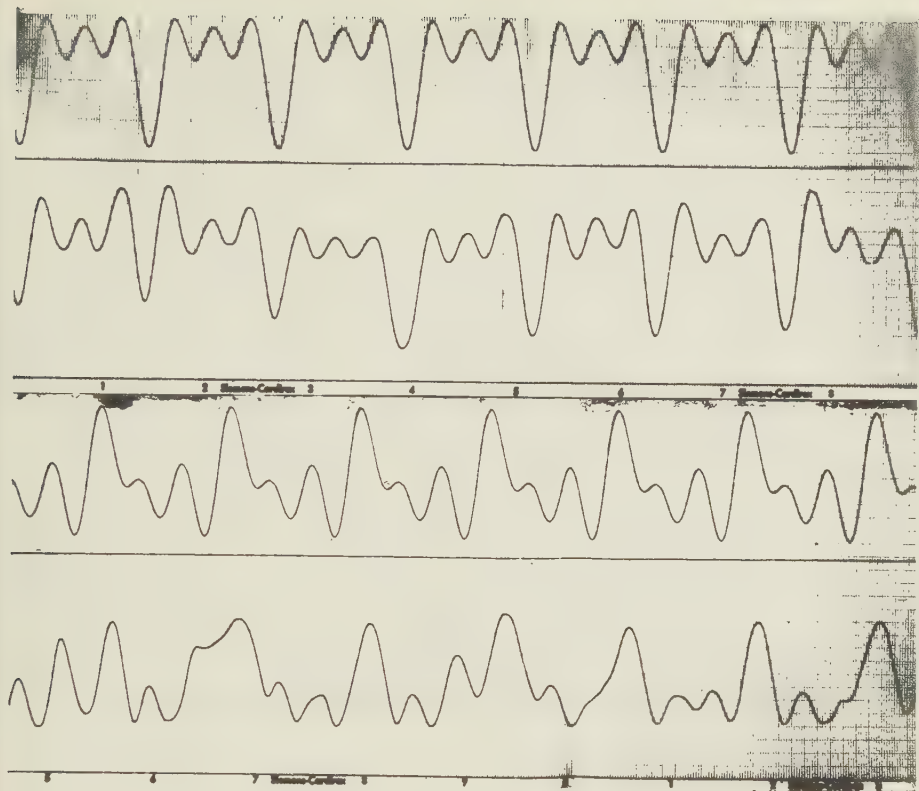


Abbildung 3.

Originalkurven aus den Versuchen mit "einfachem" und "kompliziertem" Erregungsmuster. Die Grundfrequenz betrug 1,0 Hz.

Von oben nach unten zeigt die Abbildung: Vorgabe einfach, Folge einfach, Vorgabe kompliziert und Folge kompliziert. Hier und in allen folgenden Abbildungen wurden beide Registrierungen von der gleichen Versuchsperson für denselben Zeitpunkt der Folgebewegung erhalten.

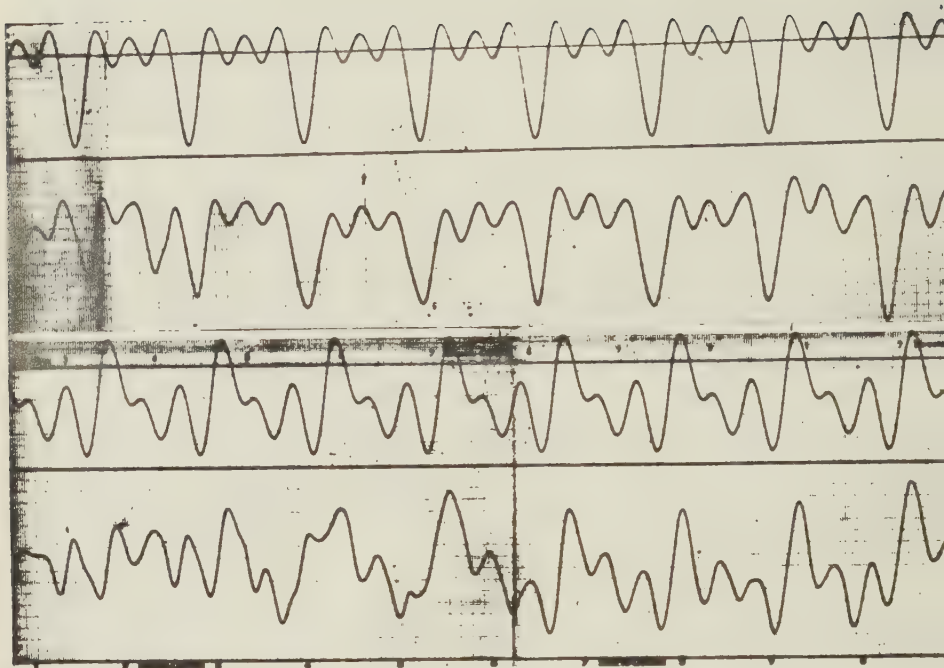


Abbildung 4.

Vergleich des Anfangs der Folgebewegung bei einfachem und bei kompliziertem Muster. Während das einfache Muster schnell richtig nachgebildet wird, ist dies bei dem komplizierten nicht der Fall.

Der Augenblick in dem das Licht angeschaltet wurde liegt am linken Bildrand.

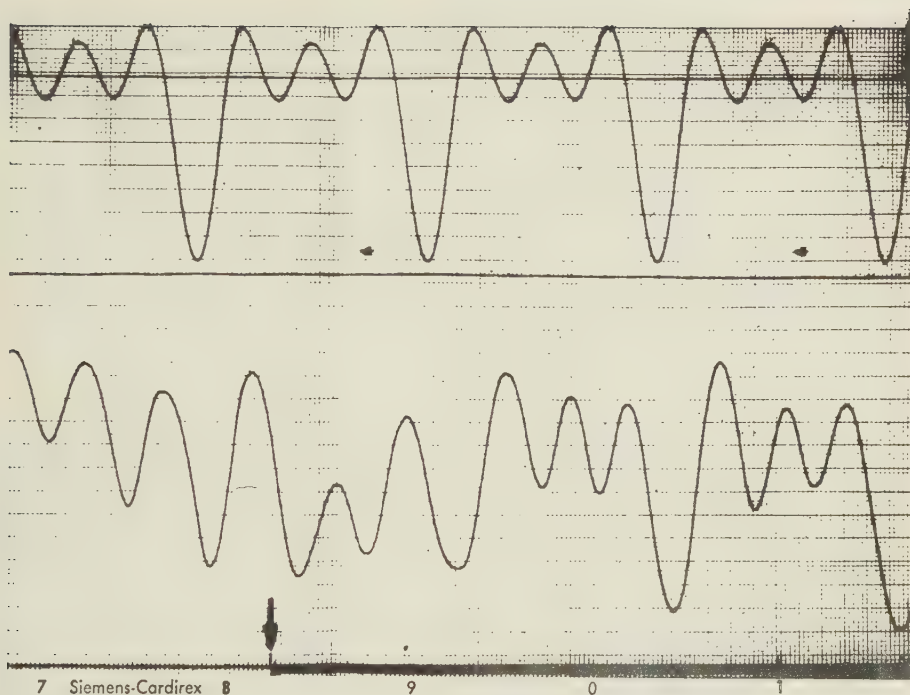


Abbildung 5.

Der Übergang der Folgebewegung (unten) aus dem Versuchsabschnitt in dem die Vp. Sicht auf die Vorgabe- und Folgebewegung hatte zu dem Abschnitt in dem das Licht ausgeschaltet war und die Vp. die Augen geschlossen hatte, ist hier gezeigt. Die obere Kurve ist die Registrierung des Erregungsmusters; der Pfeil markiert den Augenblick in dem das Licht ausgeschaltet wurde und die Vp. die Augen schloß. Für diesen Fall zeigt sich deutlich die bessere Reproduktion des Musters in der Dunkelpphase.

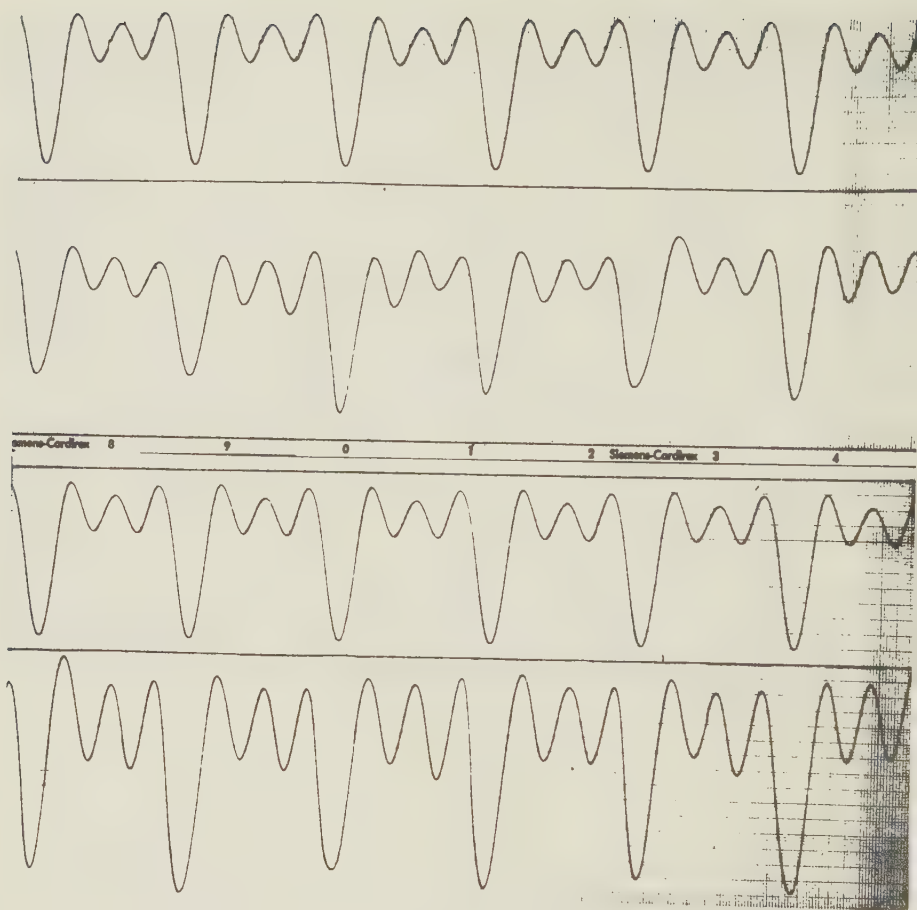


Abbildung 6.

Hier zeigen die oberen beiden Kurven einen Ausschnitt aus einem Versuch mit geschlossenem System, die unteren beiden einen entsprechenden Ausschnitt aus einem Versuch mit offenem System.

Die Amplitudenvergrößerung der Antwortkurve im offenen System ist deutlich zu erkennen.

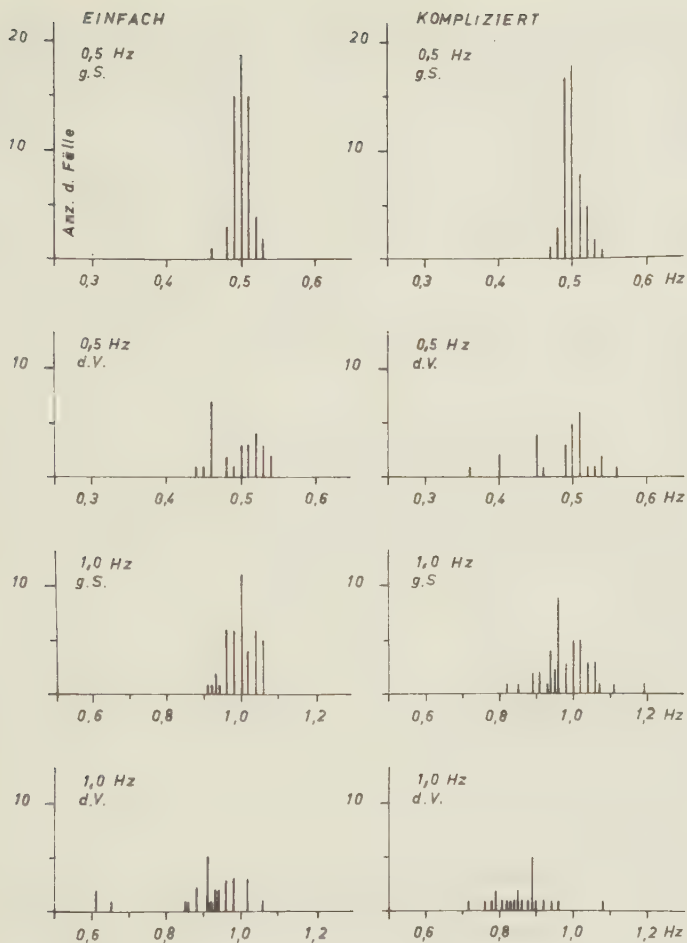


Abbildung 7.

Die Abweichung der Frequenz einer Periode von der Sollfrequenz ist hier für die Fälle aufgetragen, die auch zur Fourieranalyse herangezogen wurden. Die Abszisse gibt die Frequenz, die Ordinate die Anzahl der Fälle wieder.

g.S. = geschlossenes System

d.V. = Dunkelversuche (bei abgeschaltetem Licht und geschlossenen Augen der Vp.)

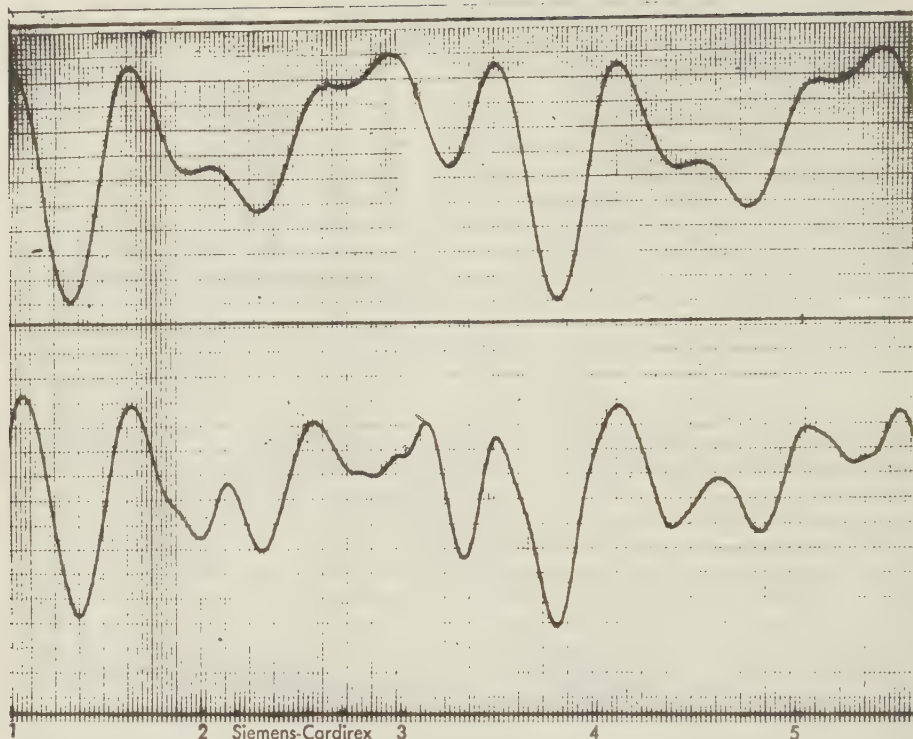


Abbildung 8.

Beispiel einer Vorgabekurve (oben) und einer Folgekurve (unten) eines Versuchs mit periodischem Muster, zusammengesetzt aus fünf Sinusschwingungen. Die Grundfrequenz beträgt 0,25 Hz.

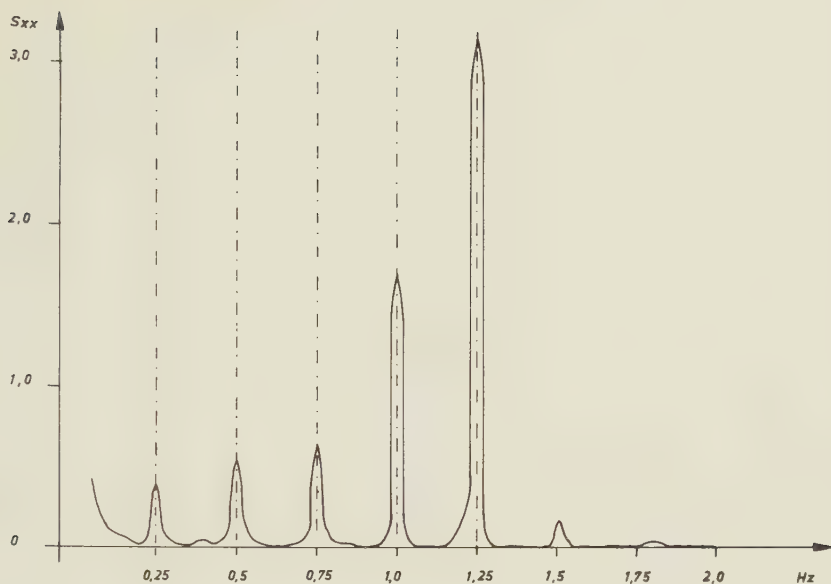


Abbildung 9.

Leistungsspektrum einer Folgekurve auf eine periodische Vorgabe, die aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzt war. Die Abszisse gibt die Frequenz in Hz, die Ordinate, deren Einheiten willkürlich gewählt sind, die Amplituden an. Die senkrechten gestrichelten Linien bezeichnen die Lage der Sollfrequenzen. Die Amplituden der entsprechenden Vorgabefrequenzen lagen bei 1,0. Deutlich ist der Anstieg der Amplitudenwerte mit zunehmender Frequenz zu erkennen.

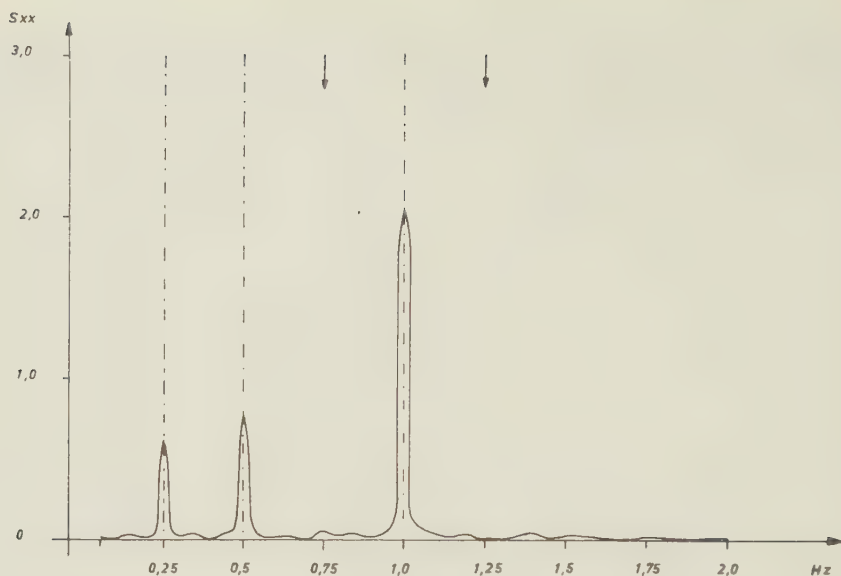


Abbildung 10.

Leistungsspektrum einer Folgekurve auf die Vorgabe eines periodischen Musters. Die Pfeile bezeichnen die Frequenzen der Oberwellen, die aus der Vorgabe herausgeschaltet wurden und in der Antwort auch nicht enthalten sind.

Bezeichnungen wie in Abb. 9.

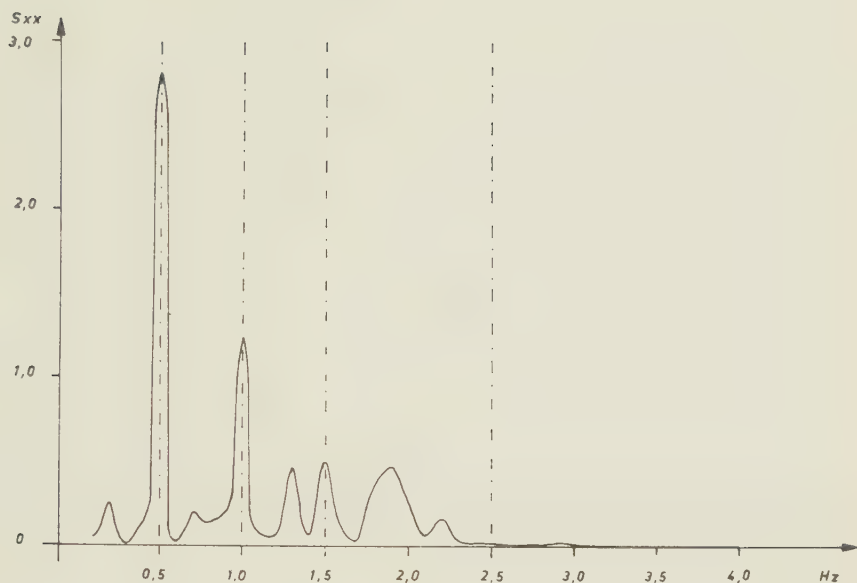


Abbildung 11.

Leistungsspektrum bei periodischem Vorgabemuster von 0,5 Hz Grundfrequenz. Die 3. Oberwelle ist abgeschaltet. Es treten zusätzliche Amplitudengipfel auf; die Amplituden fallen mit steigender Frequenz. Bezeichnungen wie in Abbildung 9.

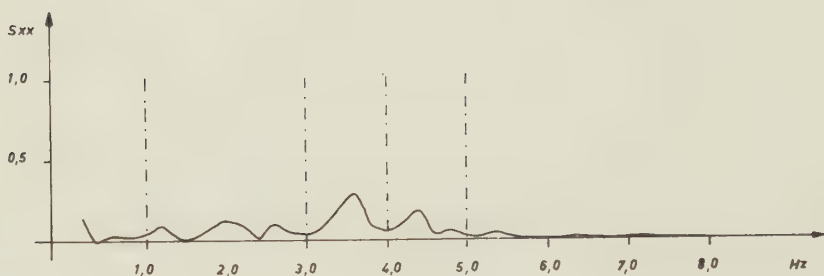


Abbildung 12.

Leistungsspektrum einer Folgekurve bei Vorgabe des periodischen Musters mit einer Grundfrequenz von 1,0 Hz.

Hier ist die 1. Oberwelle abgeschaltet.

Die Amplituden sind stark geschrumpft. Es treten keine eindeutigen Amplitudengipfel mehr auf; das Spektrum zeigt eine Tendenz zu verstreichen.

Bezeichnungen wie in Abbildung 9.

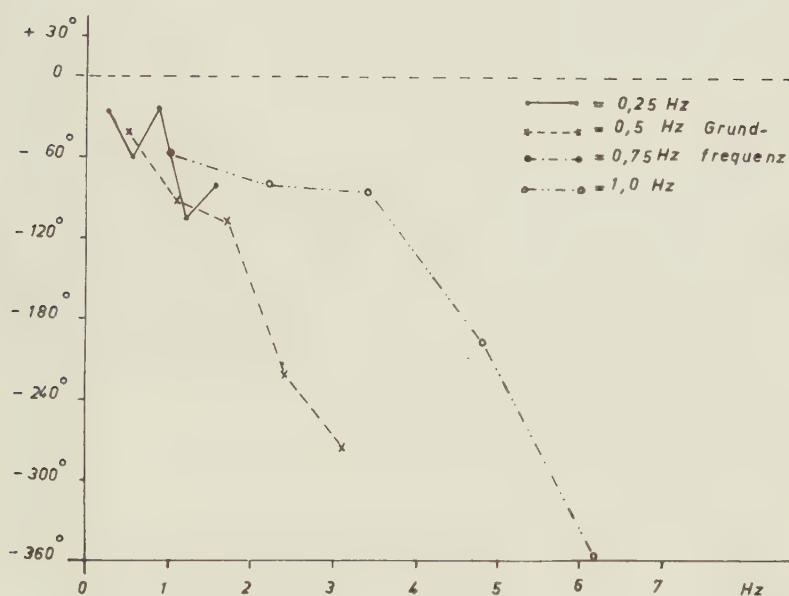
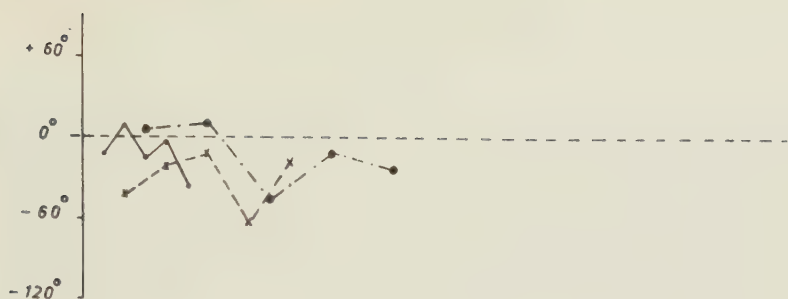


Abbildung 13.

a) Phasenverhalten der Versuche mit periodischem Muster aus fünf harmonischen Schwingungen. Die Abszisse gibt die Frequenz in Hz, die Ordinate die Phasenverschiebung an.

b) Phasenverhalten der Versuche mit nichtperiodischem Muster. Bezeichnungen wie in Abbildung 13 a.

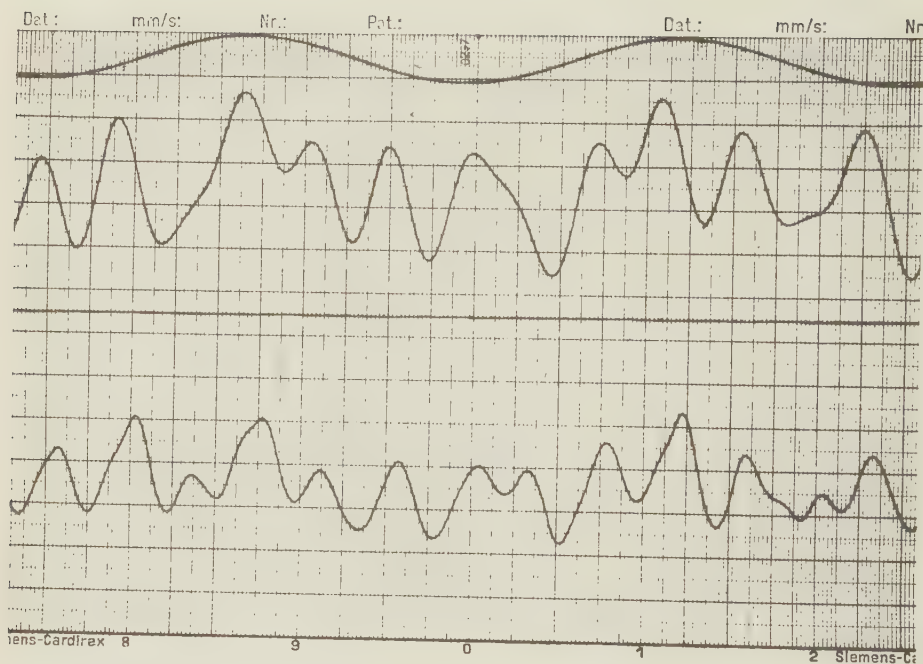


Abbildung 14.

Ausschnitt aus einem Versuch mit nichtperiodischem Vorgabemuster.

Die Sinusschwingung am oberen Rande der Abbildung ist die getrennte Registrierung der Grundschwingung des Erregungsmusters, deren Frequenz hier 0,25 Hz beträgt. Die folgende Kurve ist die Vorgabe, die untere die Folgebewegung.

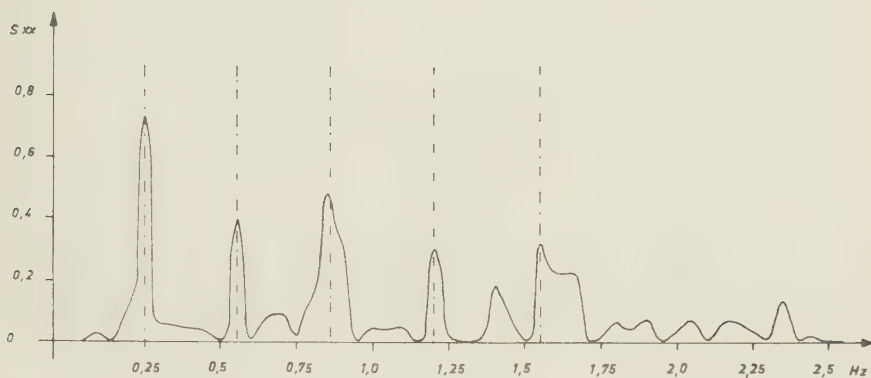


Abbildung 15.

Leistungsspektrum einer Folgekurve, die auf eine Vorgabe eines nichtperiodischen Erregungsmusters mit einer Grundfrequenz von 0,25 Hz zustande kam. Bezeichnungen wie in Abbildung 9.

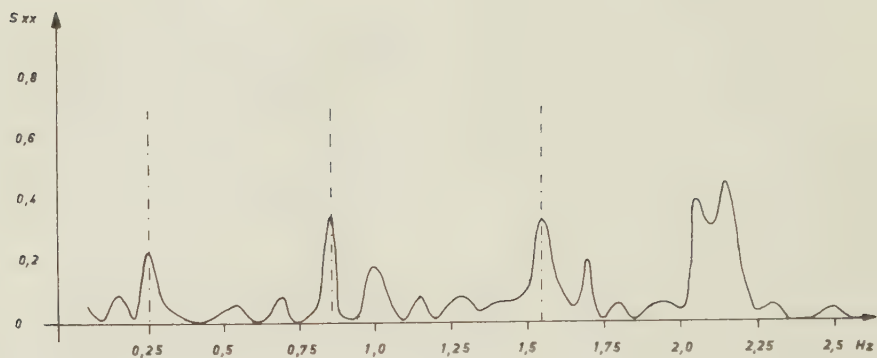


Abbildung 16.

Leistungsspektrum der Folgekurve bei Vorgabe eines nicht-periodischen Musters mit 0,25 Hz Grundfrequenz. Die 1. und 3. Oberwelle sind abgeschaltet.

Besonders zu beachten ist der breite Amplitudengipfel zwischen 2,0 und 2,25 Hz. Die höchste im Erregungsmuster enthaltene Frequenz betrug 1,55 Hz.

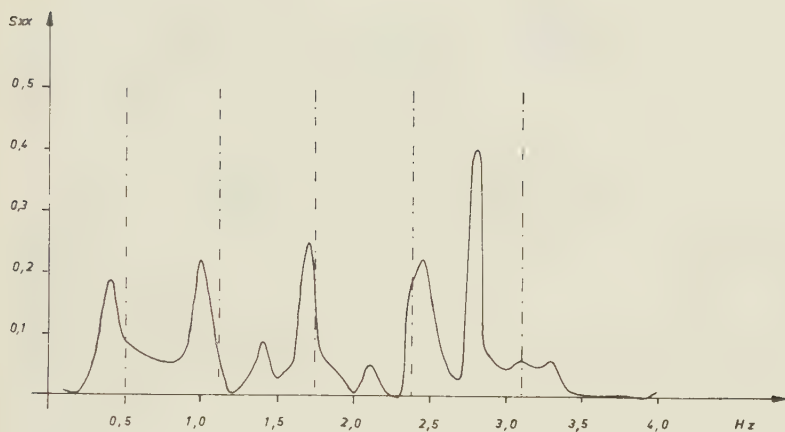


Abbildung 17.

Leistungsspektrum einer Folgekurve auf die Vorgabe eines nichtperiodischen Musters mit einer Grundfrequenz von 0,5 Hz. Keine der Sollfrequenzen wird genau getroffen. Bezeichnungen wie in Abbildung 9.

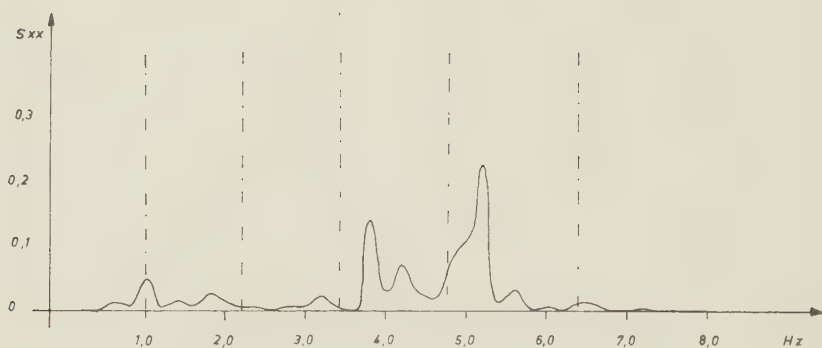


Abbildung 18.

Leistungsspektrum bei einem nichtperiodischen Erregungsmuster mit einer Grundfrequenz von 1,0 Hz.

Die Amplituden sind stark geschrumpft. In einem Bereich von 3,5 Hz bis 5,5 Hz liegen im Wesentlichen die Frequenzen der Antwortkurve.

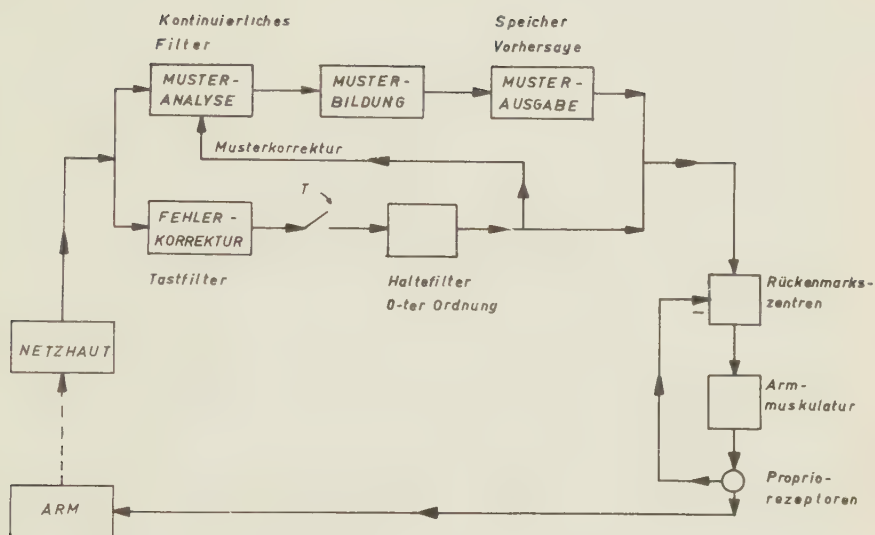


Abbildung 19.

Der Regelkreis der Handbewegung, wie er sich auf Grund unserer Untersuchungen aufstellen läßt.

L E B E N S L A U F

Am 4. Juni 1936 wurde ich als Sohn des Syndikus Dr. jur. Kurt Hummel und seiner Ehefrau Silvia geb. de Watterville in Darmstadt geboren.

Von 1942 bis 1946 besuchte ich Volksschulen in Darmstadt, Wolfskehlen bei Darmstadt und Reichelsheim/Odw., von Herbst 1946 bis Frühjahr 1957 die Georg Büchner Schule, Realgymnasium für Jungen in Darmstadt.

Seit 1957 bin ich Student an der Johann Wolfgang Goethe Universität in Frankfurt am Main, wo ich zunächst ein Semester Rechtswissenschaft studierte und dann zur Medizinischen Fakultät überwechselte. Die Naturwissenschaftliche- und Medizinische Vorprüfung habe ich bestanden und stehe nun vor dem 11. Fachsemester.

Darmstadt, 5.3.63

Jander. H. Hummel

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die der Medizinischen Fakultät Frankfurt/Main zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel

Untersuchungen über die Folgebewegung der menschlichen Hand bei verschiedenen Erregungsmustern

im Institut für Animalische Physiologie in Frankfurt/Main unter Leitung von Herrn Priv.-Doz. Dr. G. Vossius mit Unterstützung durch Herrn Prof Dr. K. Wezler ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- und ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Darmstadt, den 5.3.1963

J. A. H. H. H. H.

Verzeichnis meiner akademischen Lehrer

Prof. Dr. phil. M. Czerny
Prof. Dr. rer. nat. H. Müser
Prof. Dr. phil. nat. P. Royen
Prof. Dr. phil. Th. Wieland
Prof. Dr. phil. H. Giersberg
Prof. Dr. rer. nat. W. Halbsguth
Prof. Dr. med. D. Starck
Prof. Dr. med. R. Ortmann
Prof. Dr. med. H. Frick
Prof. Dr. med. K. Wezler
Prof. Dr. med. E. Heinz
Prof. Dr. med. L. Róka
Prof. Dr. med. B. de Rudder
Prof. Dr. med. R. Thiel
Prof. Dr. phil. nat. B. Rajewsky
Prof. Dr. med. K. Herzberg
Prof. Dr. med. F. Hoff
Prof. Dr. med. P. Holtz
Prof. Dr. med. R. Geißendörfer
Prof. Dr. med. J. Zutt
Prof. Dr. med. R. Mittermaier
Prof. Dr. med. dent. J. v. Reckow
Prof. Dr. med. E. Güntz
Prof. Dr. med. F. Herrmann
Prof. Dr. med. W. Rotter
Prof. Dr. med. W. Artelt
Prof. Dr. med. J. Frey
Prof. Dr. med. W. Krücke
Prof. Dr. med. F. Strnad
Prof. Dr. med. W. Amelung
Prof. Dr. med. G. Kahlau
Prof. Dr. med. P. Duus
Prof. Dr. med. J. Jürgens

Prof. Dr. med. K.L. Radenbach
Prof. Dr. med. H. Martin
Prof. Dr. med. K. Weiße
Prof. Dr. med. A.W. Schwenzer
Prof. Dr. med. E. Ungeheuer
Prof. Dr. med. H. Lapp
Prof. Dr. med. H.G. Boenninghaus
Prof. Dr. med. G. Leonhardi
Prof. Dr. med. H. Pfeiffer
Prof. Dr. med. L. Heller
Priv.-Doz. Dr. med. P. Christ
Priv.-Doz. Dr. med. R. Heinecker
Priv.-Doz. Dr. med. K.H. Brehm
Priv.-Doz. Dr. med. J.E. Otto
Priv.-Doz. Dr. med. W. Weber
Priv.-Doz. Dr. med. H. Zimmermann

